

# ESTABILIZACIÓN DE SUELO MEDIANTE ADITIVOS ALTERNATIVOS

JUAN DAVID RAMOS VÁSQUEZ

JUAN PABLO LOZANO GOMEZ

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTA D.C

2019

# ESTABILIZACIÓN DE SUELO MEDIANTE ADITIVOS ALTERNATIVOS

JUAN DAVID RAMOS VÁSQUEZ

JUAN PABLO LOZANO GOMEZ

Ing. Ms. C. Laura Maria Espinosa Hermida

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTA D.C

2019



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra  
hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Dedicamos esta tesis

A nuestros padres, por todo el apoyo que nos han brindado, formándonos para ser  
hombres de bien con la sociedad.

A nuestras hermanas, por estar con nosotros.

Y a todas nuestras hermosas familias.

## Agradecimiento

Agradecer a todos los profesores de la Universidad Católica de Colombia, especialmente al Ing. David Bernal, Ing. Juan Gabriel Bastidas y a la Ing. Laura Espinosa, por sus enseñanzas y experiencias transmitidas.

También deseamos agradecer a todas las personas que han estado a nuestro lado apoyándonos en este proceso, en especial a nuestros compañeros de clase.

## CONTENIDO

1. Introducción.....	13
2. Resumen.....	14
3. Capítulo 1.....	15
3.1. Planteamiento del problema.....	15
3.2. Objetivos.....	15
3.2.1. Objetivo General.....	15
3.2.2. Objetivos Específicos.....	15
3.3. Justificación.....	16
4. Capítulo 2.....	17
4.1. Antecedentes.....	17
4.2. Marco de Referencia.....	17
4.2.1. Marco Teórico.....	17
4.2.1.1. Mejoramiento de Subrasantes.....	17
4.2.1.2. Suelos Colapsables.....	18
4.2.1.3. Fundamentos de Estabilización de Suelos con Fines de Pavimentación.....	20
4.2.1.4. Subrasante.....	20
4.2.1.5. Fundamentos de Estabilización Suelos.....	20
4.2.1.6. Tipos de Estabilización.....	21
4.2.2. Marco Conceptual.....	22
4.2.2.1. Cenizas de Carbón.....	22
4.2.2.2. Cal.....	23
4.2.3. Marco Legal.....	24
4.2.3.1. Pruebas de Laboratorio.....	24
4.2.3.2. Propiedades Índice.....	24
4.2.3.3. Pruebas de Resistencia.....	26
5. Capítulo 3.....	30
5.1. Metodología.....	30
5.1.1. Etapa 1: Caracterización de los Materiales.....	30
5.1.1.1. Laboratorio de determinación de humedad.....	31

5.1.1.2.	Laboratorio de granulometría.....	31
5.1.1.3.	Laboratorio de limite líquido.....	31
5.1.1.4.	Laboratorio limite plástico e índice de plasticidad.....	32
5.1.1.5.	Laboratorio de gravedad especifica.....	32
5.1.1.6.	Laboratorio de Ph. I.N.V.E – 131. Ph de los Suelos.....	33
5.1.2.	Etapa 2: Suelo Base.....	33
5.1.2.1.	Laboratorio relación de humedad.....	34
5.1.2.2.	Laboratorio de consolidación.....	34
5.1.2.3.	Laboratorio de compresión inconfiada.....	35
5.1.2.4.	Laboratorio de corte directo.....	35
5.1.3.	Etapa 3: Mejoramiento del Suelo.....	36
5.2.	Limitaciones.....	36
6.	Capítulo 4. Caracterización del Suelo Base.....	37
6.1.	Lugar de Extracción del Suelo.....	37
6.2.	Características Físicas.....	37
6.3.	Densidad Máxima y Humedad Óptima.....	38
6.4.	Compresión Inconfiada.....	39
6.5.	Corte Directo.....	40
6.6.	Consolidación Unidimensional.....	41
6.7.	Ph del Suelo.....	42
7.	Capítulo 5. Caracterización de los Aditivos.....	43
7.1.	Caracterización de la Cal.....	43
7.1.1.	Lugar de Extracción de la Cal.....	43
7.1.2.	Composición Química.....	43
7.1.3.	Granulometría de la Cal.....	43
7.1.4.	Preparación de la Cal Como Material Estabilizante.....	44
7.2.	Caracterización de las Cenizas.....	44
7.2.1.	Lugar de Extracción de las Cenizas.....	44
7.2.2.	Granulometría de las Cenizas.....	45
7.2.3.	Preparación de las Cenizas Como Material Estabilizante.....	45
8.	CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN DEL SUELO.....	46

8.1.	Resultados.....	46
8.1.1.	Humedad Óptima – Densidad.....	46
8.1.2.	Compresión Inconfinada.....	47
8.1.3.	Corte Directo.....	48
8.1.4.	Ph.....	49
8.1.5.	Costos.....	51
8.2.	Análisis de Resultados.....	52
9.	Conclusiones.....	55
10.	Bibliografía.....	56
11.	Anexos.....	58
11.1.	Fotografías Ensayos de Laboratorio.....	58
11.1.	Resultados Ensayos De Laboratorio Humedad Optima.....	66
11.1.1.	Mezcla 1. S60-C40.....	66
11.1.2.	Mezcla 2. S80-C20.....	66
11.1.3.	Mezcla 3. S90-C10.....	67
11.1.4.	Mezcla 4. S60-CCM40.....	67
11.1.5.	Mezcla 5. S80-CCM20.....	68
11.1.6.	Mezcla 6. S90-CCM10.....	68
11.2.	Resultados De Laboratorio Compresión Inconfinada.....	69
11.2.1.	Mezcla 1. S60-C40.....	69
11.2.2.	Mezcla 2. S80-C20.....	70
11.2.3.	Mezcla 3. S90-C10.....	71
11.2.4.	Mezcla 4. S60-CCM40.....	72
11.2.5.	Mezcla 5. S80-CCM20.....	74
11.2.6.	Mezcla 6. S90-CCM10.....	75
11.3.	Resultados De Laboratorio Corte Directo.....	76
11.3.1.	Mezcla 1. S60-C40.....	76
11.3.2.	Mezcla 2. S80-C20.....	76
11.3.3.	Mezcla 3. S90-C10.....	77
11.3.4.	Mezcla 4. S60-CCM40.....	78
11.3.5.	Mezcla 5. S80-CCM20.....	78

11.3.6. Mezcla 6. S90-CCM10.....79

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Flujograma Caracterización del Material. ....	30
Ilustración 2. Flujograma Suelo Base. ....	33
Ilustración 3. Flujograma Mejoramiento del Suelo. ....	36
Ilustración 4. Gráfica Humedad Óptima S100.....	38
Ilustración 5. Grafica Deformación vs. Esfuerzo S100.....	39
Ilustración 6. Envolverte Corte Directo S100.....	40
Ilustración 7. Grafica Esfuerzo vs. Relación de Vacíos S100. ....	41
Ilustración 8. Grafica Tiempo vs Deformación .....	42
Ilustración 9. Grafica Curva Granulométrica. ....	45
Ilustración 10. Grafica Densidad Óptima. ....	46
Ilustración 11. Grafica Humedad Óptima. ....	47
Ilustración 12. Grafica Esfuerzo Máximo. ....	48
Ilustración 13. Grafica Angulo de Fricción. ....	49
Ilustración 14. Grafica Cohesión. ....	49
Ilustración 15. Grafica Ph Concentraciones.....	50
Ilustración 16. Grafica Análisis de Costos.....	51
Ilustración 17. Comparación Esfuerzo Máximo.....	52
Ilustración 18. Comparación Ángulos de Fricción. ....	53
Ilustración 19. Comparación Cohesión. ....	53
Ilustración 20. Muestra Compresión Inconfinada.....	58
Ilustración 21. Maquina Compresión Inconfinada. ....	58
Ilustración 22. Anillo de Consolidación. ....	59
Ilustración 23. Consolidometro.....	59
Ilustración 24. Consolidación Muestras. ....	60
Ilustración 25. Maquina Corte Directo.....	60
Ilustración 26. Muestra Corte Directo.....	61
Ilustración 27. Tamizado de Cenizas.....	61
Ilustración 28. Granulometría Cenizas.....	62
Ilustración 29. Preparación Moldes.....	62
Ilustración 30. Preparación Muestras.....	63
Ilustración 31. Preparación de las Mezclas.....	63
Ilustración 32. Medición Ph de las Mezclas. ....	64
Ilustración 33. Preparación Proctor.....	64
Ilustración 34. Proctor. ....	65
Ilustración 35. Grafica Humedad Optima S60-C40. ....	66
Ilustración 36. Grafica Humedad Optima S80-C20.....	66
Ilustración 37. Grafica Humedad Optima S90-C10.....	67
Ilustración 38. Grafica Humedad Optima S60-CCM40. ....	67
Ilustración 39. Grafica Humedad Optima S80-CCM20. ....	68
Ilustración 40. Grafica Humedad Optima S90-CCM10. ....	68

Ilustración 41. Grafica Deformación vs. Esfuerzo S60-C40.....	69
Ilustración 42. Grafica Deformación vs. Esfuerzo S80-C20.....	70
Ilustración 43. Grafica Deformación vs. Esfuerzo S90-C10.....	71
Ilustración 44. Grafica Deformación vs. Esfuerzo S60-CCM40. ....	73
Ilustración 45. Grafica Deformación vs. Esfuerzo S80-CCM20. ....	74
Ilustración 46. Grafica Deformación vs. Esfuerzo S90-CCM10. ....	75
Ilustración 47. Envolverte Corte Directo S60-C40.....	76
Ilustración 48. Envolverte Corte Directo S80-C20.....	76
Ilustración 49. Envolverte Corte Directo S90-C10.....	77
Ilustración 50. Envolverte Corte Directo S60-CCM40. ....	78
Ilustración 51. Envolverte Corte Directo S80-CCM20. ....	78
Ilustración 52. Envolverte Corte Directo S90-CCM10. ....	79

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación General del Suelo. ....	24
Tabla 2. Dimensiones Cilindro Compresión Inconfinada S100. ....	39
Tabla 3. Resultados Corte Directo S100. ....	40
Tabla 4. Resumen Consolidación Unidimensional S100. ....	41
Tabla 5. Preparación de la Cal. ....	44
Tabla 6. Preparación de las Cenizas. ....	45
Tabla 7. Resumen Laboratorios Compresión Inconfinada. ....	47
Tabla 8. Dimensiones Cilindro Compresión Inconfinada S60-C40. ....	69
Tabla 9. Resumen Laboratorio Compresión Inconfinada S60-C40. ....	69
Tabla 10. Dimensiones Cilindro Compresión Inconfinada S80-C20. ....	70
Tabla 11. Resumen Laboratorio Compresión Inconfinada S80-C20. ....	70
Tabla 12. Dimensiones Cilindro Compresión Inconfinada S90-C10. ....	71
Tabla 13. Resumen Laboratorio Compresión Inconfinada S90-C10. ....	71
Tabla 14. Dimensiones Cilindro Compresión Inconfinada S60-CCM40. ....	72
Tabla 15. Resumen Laboratorio Compresión Inconfinada S60-CCM40. ....	72
Tabla 16. Dimensiones Cilindro Compresión Inconfinada S80-CCM20. ....	74
Tabla 17. Resumen Laboratorio Compresión Inconfinada S80-CCM20. ....	74
Tabla 18. Dimensiones Cilindro Compresión Inconfinada S90-CCM10. ....	75
Tabla 19. Resumen Laboratorio Compresión Inconfinada S90-CCM10. ....	75
Tabla 20. Resultados Corte Directo S60-C40. ....	76
Tabla 21. Resultados Corte Directo S80-C20. ....	77
Tabla 22. Resultados Corte Directo S90-C10. ....	77
Tabla 23. Resultados Corte Directo S60-CCM40. ....	78
Tabla 24. Resultados Corte Directo S80-CCM20. ....	79
Tabla 25. Resultados Corte Directo S90-CCM10. ....	79

## 1. Introducción.

La duración y el funcionamiento de una estructura o un proyecto de construcción dependen en una mayor parte de la estructura de los suelos en fundación. Los suelos que presentan materiales inestables llegan a crear inconvenientes significativos en estructuras verticales como en las estructuras horizontales (obras viales); principalmente en las estructuras horizontales, como lo son las obras de carreteras. El tratamiento físico – químico de los materiales en el suelo, por intermedio de adición de cemento y cal, da un mejor rendimiento en las propiedades intrínsecas de los suelos inestables, aumentando así su resistencia y permitiendo así emplear dichos suelos para la construcción de estructuras de pavimentos. La estabilización del suelo logra un cambio considerable de las características físico-mecánicas, estableciendo una resistencia y estabilidad a periodos tanto cortos como largos, particularmente mejora el comportamiento del suelo ante la acción del agua y genera ahorros en términos económicos.

La estabilización de suelos, se considera una herramienta fundamental hacia el apropiado desarrollo de estructuras horizontales como lo son los pavimentos tanto rígidos como flexibles. Esto, debido a que proporcionan mejores condiciones del suelo, los materiales de transición en canteras y ríos utilizables en las construcciones, disminuyen su influencia gracias a la estabilización del suelo, optimizando los costos del desarrollo en la obra, y obteniendo un impacto ambiental menor.

Con el objetivo de asegurar una base de soporte del pavimento más invariable, minimizando en la menor medida el desplazamiento de material ya sea por comedimientos económicos, técnicos o ambientales. Se considera el uso de materiales como cenizas de carbón o cal para estabilizar suelos altamente cohesivos. Por lo tanto, en el presente trabajo de investigación, se pretende evaluar el comportamiento de manera experimental de un suelo fino con aditivos alternativos, y determinar el impacto de la estabilización sobre las características físicas y los componentes geomecánicas del material, con este fin, se evalúa el comportamiento del material mediante ensayos de laboratorio de clasificación y resistencia, cuantificándose diferentes medidas del suelo. De igual manera, se realiza una colación entre los resultados obtenido por medio de cada estabilización, determinando la relación resistencia-costo de cada material y establecer así que alternativa es la ideal, a gran escala, para el tipo de suelo aquí estudiado. Teniendo en cuenta que, el uso de las cenizas de carbón a gran escala tendría un mayor beneficio en términos ambientales, dado a la difícil disposición de este desecho de las plantas termoeléctricas.

## **2. Resumen.**

El comportamiento y propiedades del suelo natural sobre el cual se proyecta la construcción de algún tipo de estructura vial, se consideran fundamentales a la hora de diseñar estructuras de pavimentos. Lo anterior, debido a que la subrasante determina en gran medida la durabilidad de la estructura. Por lo tanto, esta investigación estudia el impacto de la estabilización de un suelo arcilloso, como el caolín, en el mejoramiento de sus condiciones portantes. Más específicamente, esta investigación desarrolla un análisis comparativo entre, un aditivo comúnmente usado, como es la cal, y un aditivo alternativo, como lo son las cenizas volantes de carbón mineral. Estos materiales se evalúan físicamente y se adicionan al suelo arcilloso en proporciones de 10%, 20 y 40% (teniendo como base el ensayo de consolidación). Adicionalmente, se realizan ensayos de compresión inconfiada y corte directo para determinar las propiedades mecánicas de cada mezcla. A partir de los resultados, se evidencia una mejora en el comportamiento mecánico del caolín por la adición de cenizas de carbón o cal, y además que en términos de resistencia-costo la ceniza muestra ser la mejor opción de estabilización.

## **3. Capítulo 1.**

### **3.1. Planteamiento del problema.**

Uno de los mayores problemas a tratar en una obra de construcción, hace referencia a la calidad del suelo. Se ha evidenciado que, en obras viales, un suelo con poca resistencia y alta reacción al agua puede generar hundimiento en algunos sectores o el rompimiento de la estructura súbitamente. Estos daños tienden a ser atribuidos a las características geológicas del terreno como también a la intervención humana, sin tenerse en cuenta que están ligados directamente a las características del suelo natural.

Con la presente investigación se pretende estudiar el uso de materiales como las cenizas de carbón y la cal como posibles aditivos para el progreso de la capacidad portante de los suelos arcillosos (como aquellos encontrados en la ciudad de Bogotá). Y resolver a la pregunta de investigación: ¿Qué beneficios conlleva la estabilización de un suelo con materiales alternativos en sus características intrínsecas y su costo beneficio a comparación de materiales de estabilización establecidos?

### **3.2. Objetivos.**

#### **3.2.1. Objetivo General.**

Estudiar las propiedades físico-mecánicas de un suelo de subrasante, mediante el uso de aditivos alternativos como las cenizas de carbón y convencionales como la cal.

#### **3.2.2. Objetivos Específicos.**

- Determinar las propiedades físicas y mecánicas de un suelo arcilloso en el laboratorio.
- Determinar el porcentaje óptimo de las cenizas de carbón y cal, para estabilización de suelos.
- Evaluar el comportamiento mecánico por medio compresión inconfiada y corte directo de los suelos estabilizados con materiales tanto alternativos como convencionales.
- Analizar el costo de la estabilización del material con la utilización de aditivos no convencionales.

### **3.3. Justificación.**

La disposición final segura y ambientalmente correcta de residuos sólidos provenientes de la industria y del sector agrícola es considerado un problema ambiental. En este sentido, estos residuos deben ser estudiados técnicamente a fin de generar alternativas para su reutilización, con el propósito de generar prácticas de la ingeniería civil sustentable y contribuir a la preservación y conservación del medio ambiente.

En el ámbito nacional, el uso de estabilizantes de suelos para mejorar las propiedades físico-mecánicas del suelo en carreteras es limitado. Lo anterior, debido a la asociación con el precio de estas soluciones, sin tener en cuenta el alto costo que genera igualmente el mantener las vías construidas con subrasantes convencionales. Vías necesarias para la movilización de bienes y personas y que constituyen uno de los principales aspectos relacionados con la productividad de una ciudad, de una región y del país.

El presente estudio tiene como propósito dar un aporte para mejorar la propiedades físico mecánicas, químicas y geomecánicas de un suelo cohesivo perteneciente a la subrasante mediante la adición de cenizas de carbón y cal, como un subproducto dado en la industria, con el fin de exponer un mejor comportamiento del suelo tratado ante las diferentes solicitudes de cargas que se transmitirán a este.

## **4. Capítulo 2.**

### **4.1. Antecedentes.**

El objetivo primordial de la estabilización de los suelos es modificar sus propiedades físicas, mecánicas y químicas y a la vez aumentar su resistencia y durabilidad con el fin de encontrar un suelo óptimo. Para el mejoramiento del suelo se implementan con mayor frecuencia cemento, cal, asfalto y arena, con fines en la construcción de obras horizontales.

Según la investigación de la Ing. Roció, "las cenizas volantes funcionan como aditivo inhibidor de las propiedades expansivas del material, pero este requiere ser adicionado en porcentajes excesivos, al menos en el caso de una arcilla expansiva, en promedio mayor a 20%"<sup>1</sup>. Además de esto, la Ing. Roció define que: "la adición de ceniza volante en la arcilla disminuye los efectos de expansión, la gravedad específica, la plasticidad y humedad de la arcilla. Las arcillas en combinación con cenizas volantes y cemento en un 3%, da buenos resultados mejorando la resistencia del suelo arcilloso desde 7.7% hasta 51% de CBR al 100% de la MDS del Proctor Modificado y obteniéndose menores costos en su construcción"<sup>2</sup>.

### **4.2. Marco de Referencia.**

#### **4.2.1. Marco Teórico.**

##### **4.2.1.1. Mejoramiento de Subrasantes.**

Las subrasantes de poca resistencia son un problema común en la construcción de pavimentos. La existencia de una falla en la subrasante sobre la que esta cimentada el pavimento llevara a un deterioro rápido de la estructura del mismo.

Tradicionalmente, las subrasantes de poca resistencia u oscilantes deben retiradas y remplazada por rellenos de sustitución o estabilizadas químicamente. Ambas opciones son caras y consumen mucho tiempo.

---

<sup>1</sup> Pérez Collantes, Roció del Carmen. "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos." (2012).

<sup>2</sup> Ibíd.

#### 4.2.1.2. Suelos Colapsables.

##### - Características comunes:

Reginatto señala que:

[...] en general, los suelos colapsables presentan una serie de características comunes, tales como:

- Estructura macro porosa, con índice de huecos, entre relativamente alto, a muy alto.
- Granulometría predominantemente fina, con predominio de fracciones de limos y de arcilla. El tamaño de los granos es generalmente poco distribuido y con los granos más grandes escasamente meteorizados. La mayoría de las veces, la cantidad de la fracción arcilla es relativamente escasa, pero, sin embargo, tiene una influencia importante en el comportamiento mecánico de la estructura intergranular.
- Estructura mal acomodada, con partículas de mayor tamaño separadas por espacios abiertos, y unidas entre sí por acumulaciones o "puentes" de material predominantemente arcilloso. En muchos casos existen cristales de sales solubles insertados en tales puentes o uniones arcillosas<sup>3</sup>.

##### - Definición de colapso:

Zur y Wisemam definen:

[...] como colapso a cualquier disminución rápida de volumen del suelo, producida por el aumento de cualquiera de los siguientes factores:

- Contenido de humedad ( $w$ ).
- Grado de saturación ( $S_r$ ).
- Tensión media actuante ( $\tau$ ).
- Tensión de corte ( $\sigma$ ).
- Presión de poros ( $u$ ).

Reconociendo por lo tanto que el colapso de la estructura del suelo puede producirse por una variedad de procesos diferentes de la saturación<sup>4</sup>.

Reginatto sugiere que: "a esta lista de factores puede agregarse la interacción química entre el líquido saturante y la fracción arcillosa"<sup>5</sup>.

---

<sup>3</sup> Reginatto, A. R., and J. C. Ferrero. "Collapse potential of soils and soil-water chemistry." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. Vol. 12. No. 4. Elsevier Science, 1975.

<sup>4</sup> Zur, Abraham, and Gdalyah Wiseman. "A study of collapse phenomena of an undisturbed loess: Conference. Session four. 5F, 11R. PROC. EIGHTH INT. CONF. ON SOIL MECH. FOUND. ENGG. MOSCOW, V2. 2, 1973, P265–269." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Vol. 12. No. 4. Pergamon, 1975.

<sup>5</sup> Reginatto. Op.Cit.

A efectos de definir y diferenciar los distintos tipos de colapso. Uriel y Serrano clasifican a los suelos colapsables o desmoronables en:

- Grupo I: Suelos en los que tiene lugar un rápido cambio de la relación entre presiones efectivas y las deformaciones sin que se alcance la resistencia última del material. De acuerdo con esto la causa del colapso es únicamente el cambio de las presiones efectivas. A este grupo pertenecen los limos o arcillas cementadas y las rocas de gran porosidad. Cuando se ensaya a humedad constante, se detecta una notable modificación de su módulo de compresibilidad al alcanzar un cierto valor las presiones efectivas.
- Grupo II: Suelos en los que, sin la presencia o cambio de las condiciones que producen el colapso, no hay cambio abrupto en la relación presión-deformación. Tal es el caso de los loess y algunas arcillas que contienen sulfatos. Si se ensayan humedad constante, la relación tensión-deformaciones es una curva suave y continua y sin agudos quiebros. La saturación produce, sin embargo, un importante cambio volumétrico, debido probablemente a un incremento de la presión de los poros que origina el agotamiento de la resistencia al corte del suelo<sup>6</sup>.

- **Suelos colapsables por humedecimiento:**

Establecida la definición general de colapso, nuestro análisis se centrará en aquellos suelos en los cuales el colapso de la estructura del suelo es provocado por un incremento del contenido de humedad. Por lo tanto, en lo sucesivo cuando se hable de suelos colapsables, se entenderá que son aquellos suelos, en que un aumento en el contenido de humedad, provoca una brusca disminución de volumen, sin la necesidad de un aumento en la presión aplicada.

A partir de esta definición, se advierte:

- Por un lado, una destrucción o un cambio en la estructura que el suelo tenía originalmente.
- Por el otro lado, un agente externo: el agua, que provoca este fenómeno.

Tal como lo indica Reginatto:

[...] en la Mecánica de Suelos clásica de los suelos saturados o de los suelos secos el fenómeno de colapso generalmente viene asociado a un cambio en el estado tensional del suelo. En cambio, aquí, y en una primera definición, estaría provocado por un agente externo (cambio en el contenido de humedad). En el proceso de consolidación de suelos saturados (Teoría clásica de Terzaghi)

---

<sup>6</sup> Uriel, S., and A. Serrano. "Propiedades geotécnicas de dos suelos volcánicos colapsables de baja densidad en la cimentación de dos presas en las Islas Canarias (España)." *Boletín de información laboratorio del transporte y mecánica del suelo* 105 (1974): 21-28.

también se produce una disminución de volumen, pero puede decirse que en muchos aspectos el colapso es lo contrario de la consolidación<sup>7</sup>.

#### **4.2.1.3. Fundamentos de Estabilización de Suelos con Fines de Pavimentación.**

Para comprender el análisis de una estabilización del suelo es necesario conocer algunos conceptos básicos que permitan una mejor comprensión de los temas relacionados con suelos cohesivos, gravas, arenas y estabilización. En este apartado se abordan los conceptos y normas que están plenamente compenetradas a la realización de la investigación. Ya que esta investigación tiene un referente especial a las obras horizontales con particularidad, se efectuará un apartado referente a los pavimentos, con el fin de lograr una debida adecuada comprensión.

#### **4.2.1.4. Subrasante.**

De acuerdo con MTI, “es la capa construida bajo la sub – base, su función es la de recibir las cargas transmitidas por el pavimento y transmitir las en forma uniforme hacia la subyacente y el cuerpo del terraplén. Si esta capa es de buena calidad, el espesor del pavimento será menor, con lo cual existirá un ahorro económico, sin perder calidad en el pavimento. Está se encuentra conformada con suelos naturales, seleccionados o cribados, producto de cortes o de la extracción de bancos”<sup>8</sup>.

#### **4.2.1.5. Fundamentos de Estabilización Suelos.**

Según López:

El óptimo desarrollo en un funcionamiento de cualquier tipo de obra civil a un tiempo de largo plazo depende en las propiedades intrínsecas del suelo en desarrollo. Los suelos con algún tipo de inconsistencia aumentan una probabilidad de un riego significativo en la estructura tanto vertical como horizontal. El adecuado diseño, tratamiento y técnicas pertinentes en la construcción, mejorara desde su estructura química y física el suelo, para ser un material utilizable y aprovechable. Adicionalmente, la base estructural soportada de los suelos puede ser aprovechada en los pavimentos<sup>9</sup>.

Para Crespo, “llamamos estabilización de un suelo al proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que

---

<sup>7</sup> Reginatto, A. R., and J. C. Ferrero. "Collapse potential of soils and soil-water chemistry." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. Vol. 12. No. 4. Elsevier Science, 1975.

<sup>8</sup> Rivas Ortiz, Bayardo Geovanny, and Kevin Uriel Mercado Espinoza. *Propuesta de diseño de estructura de pavimento flexible del tramo comprendido del Km 2.3 al Km 2.8 de la carretera Panamericana Sur, aplicando el método de la AASHTO 93*. Diss. Universidad Centroamericana, 2015.

<sup>9</sup> López-Lara, Teresa, et al. "Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas." *Revista Iberoamericana de Polímeros* 11.3 (2010): 159-168.

podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un firme estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas”<sup>10</sup>.

#### **4.2.1.6. Tipos de Estabilización.**

Para López, hay diferentes tipos de estabilización, existen tres diferentes formas para lograrlo las cuales con las siguientes:

- **Estabilización Física.**

Este tipo de estabilización se utiliza para mejorar el suelo a partir del cambio en sus propiedades físicas por medio de mezclas en los suelos, entre los cuales existen distintos métodos:

Geotextiles. Que son telas semipermeables y no sufren biodegradación, se puede emplear como un filtro que controlará la erosión del mismo.

Vibro flotación, Mecanice de suelos. Esta sirve para aumentar la densidad de un suelo no cohesivo. Generalmente el vibrador reduce una fuerza entre los granos (intergranular entre las partículas del suelo, moviéndose a una posición lo cual les da una mayor densidad.

- **Estabilización Mecánica.**

Es aquella con la que se logra mejorar considerablemente un suelo sin que se produzcan reacciones químicas de importancia.

Compactación, este mejoramiento generalmente se hace en la subbase, base y en las carpetas asfálticas.

- **Estabilización química.**

La estabilización química utiliza ciertas sustancias químicas que actúan sobre el suelo en el cual se producen reacción que empatiza sus compuesto moléculas e iones, para cambiar la constitución del suelo. Entre estos materiales se encuentran:

- CAL. baja la plasticidad de los suelos arcillosos.
- Cemento Portland. Sube la resistencia de los suelos, generalmente se usa en arenas o gravas finas.
- Productos de Petróleo. Es un compuesto usado principalmente asfáltico para material triturado con una mínima cohesión.
- Cloruro sodio y Cloruro de Calcio. Vuelve el suelo impermeable y disminuye limos en el suelo.
- Escoria de fundición, da una mayor resistencia, comúnmente utilizados en carpetas asfálticas.
- Polímeros, se usan en carpetas asfálticas para generar mayor resistencia, impermeabilizar y mejorar e vida útil.
- Hule de neumático. Se usa también en carpetas asfálticas generalmente para dar mayor resistencia<sup>11</sup>.

---

<sup>10</sup> Villalaz, Carlos Crespo. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Editorial Limusa, 2004.

<sup>11</sup> López-Lara, Teresa, et al. "Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas." *Revista Iberoamericana de Polímeros* 11.3 (2010): 159-168.

#### 4.2.2. Marco Conceptual.

Los materiales recuperados se incorporen a la industria, evitando que su destino sean las incineradoras y vertederos, contribuyendo así a cerrar el ciclo de los materiales. Para ello fabrican y venden todo tipo de productos reciclados para la construcción.

##### 4.2.2.1. Cenizas de Carbón.

Para la Ing. Rocio:

Las cenizas volantes son procedentes de la combustión en las centrales termoeléctricas. La composición de cada una de las clases de ceniza y el porcentaje de carbón encontrado en éstas, depende del proceso que se realice en cada una de las plantas de la termoeléctrica. Las cenizas son granos finos compuestos básicamente por silicatos, aluminios, cal libre y algunos óxidos que permiten una reacción puzolánica con el suelo arcilloso que al igual que otras sustancias reduce el índice de expansión.

Una concentración de 25% de cenizas en el suelo puede resultar muy beneficiosa, afectando la granulometría, floculando los porcentajes de arcillas del suelo y reduciendo el límite líquido y el índice plástico del suelo. Las reacciones puzolánicas permiten incrementar la capacidad de soporte de la subrasante y con ello mejorar las estructuras viales en carreteras<sup>12</sup>.

Muchos investigadores han estudiado el mecanismo que contribuye al proceso de estabilización de suelos tratados con cenizas volantes, según Acosta:

Existen tres mecanismos principales contribuyendo a la estabilización. El primero es que la resistencia del suelo aumenta como resultado de la cementación producida a partir de la hidratación de aluminato tricálcico presentes en las cenizas volantes. Otro mecanismo es que la cal libre (CaO) en las cenizas volantes reacciona con los minerales de arcilla, causando compresión de la capa de absorción y la reducción en la plasticidad. Finalmente, la cal libre que no hace reaccionar con los minerales de arcilla se encuentra disponible para el proceso de cementación adicional a través de la reacción puzolánica con los compuestos de sílice y alúmina<sup>13</sup>.

Cokca explica que, "la estabilización de los suelos tratados con cenizas volantes es el resultado de intercambio de catión entre las partículas de arcilla y aluminio (Al<sup>3+</sup>), calcio (Ca<sup>2+</sup>) y hierro (Fe<sup>3+</sup>) en las cenizas volantes. Se describe el proceso de

---

<sup>12</sup> Rivas Ortiz, Bayardo Geovanny, and Kevin Uriel Mercado Espinoza. *Propuesta de diseño de estructura de pavimento flexible del tramo comprendido del Km 2.3 al Km 2.8 de la carretera Panamericana Sur, aplicando el método de la AASHTO 93*. Diss. Universidad Centroamericana, 2015.

<sup>13</sup> Acosta, H. A., T. B. Edil, and C. H. Benson. "Soil stabilization and drying using fly ash." *Geo Engineering Rep 3* (2003).

estabilización indicando que las cenizas volantes pueden proporcionar una adecuada matriz de cationes divalentes y trivalentes que bajo condiciones ionizadas origina la floculación de dispersión de las partículas de arcilla”<sup>14</sup>.

Cuando las cenizas volantes se mezclan con el suelo arcilloso, las características de compactación (densidad y óptimo contenido de humedad) de los suelos cambian. El proceso de hidratación se produce durante el contacto entre el suelo, la ceniza y el agua hace que la unión y cementación generen altos valores de densidad.

Todos los mecanismos de estabilización están relacionados con un cambio químico o proceso.

#### **4.2.2.2. Cal.**

La cal es un término que designa todas las formas físicas en las que puede aparecer el óxido de calcio (CaO). Se obtiene como resultado de la calcinación de las rocas calizas.

Dice Cabo, “la cal es uno de los productos más conocidos desde la antigüedad y con más aplicaciones diversas, en la construcción se especifica en dos ramificaciones, en la infraestructura (donde se usa en la estabilización de suelos, para secar suelos húmedos, descongelar los helados y mejorar las propiedades de los suelos arcillosos) y en la edificación (en la fabricación de prefabricados de cal, hormigón celular, ladrillos y bloques)”<sup>15</sup>.

Según Ugaz, la acción de la cal sobre las arcillas podría resumirse en dos fases:

- En una primera etapa se tiene una reacción iónica. La adición de la cal a una arcilla corresponde a un aporte masivo de iones OH<sup>-</sup> y Ca<sup>++</sup>. Los cationes de calcio se unen a las superficies de las láminas arcillosas por los efectos de intercambio catiónico, desarrollando fuerzas eléctricas suficientes para contribuir a la formación de puentes que unen a las partículas arcillosas. Esta acción, análoga a una floculación ayudan a edades tempranas a modificar el material aumentando o reduciendo el límite líquido y aumentando en mayor escala al límite plástico; lo que resulta prácticamente en una reducción en el límite plástico. Así mismo el suelo se vuelve menos sensible al agua.
- Una segunda etapa, durante la cual, las arcillas reaccionan en forma más o menos vigorosa de acuerdo con la naturaleza del mineral arcilloso. Esta reacción se traduce en una degradación más o menos acelerada del mineral arcilloso y la aparición de especies minerales nuevas, responsables del aumento en la resistencia a la compresión simple, (acción puzolánica)<sup>16</sup>.

---

<sup>14</sup> Cokca, Erdal. "Use of class c fly ashes for the stabilization of an expansive soil." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127.7 (2001): 568-573.

<sup>15</sup> Cabo Laguna, María. "Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción." (2011).

<sup>16</sup> Ugaz Palomino, Roxana María. "Estabilización de suelos y su aplicación en el mejoramiento de subrasante." (2006).

### 4.2.3. Marco Legal.

#### 4.2.3.1. Pruebas de Laboratorio.

Las pruebas de laboratorio que se efectuaron nos permiten conocer características, componentes y propiedades mecánicas de los materiales a tratar (suelos) según las normas (I.N.V.E 122, 123, 125, 126, 128, 131, 141, 151, 152, 154). Estas normas nos ayudan a conocer la identidad propia del suelo a través del sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) utilizado en obras verticales y para el uso de obras horizontales el método HRB.

Das dice que, “al clasificar de una forma adecuada un suelo se debe conocer el porcentaje de grava, de arena de limos y de arcillas, tanto, así como los coeficientes de límite líquido y límite plástico e índice de plasticidad. Todos estos datos empiezan con la toma de un análisis granulométrico, en este estudio se clasificará el suelo mediante el sistema HRB, para observar su comportamiento en el enfoque vial”<sup>17</sup>.

En la primera tabla (tabla 1) se presenta la descripción de grupos y subgrupos que contiene la clasificación de suelos según la norma AASHTO M-145:

Tabla 1. Clasificación General del Suelo.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)							Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
	A-1		A-3 <sup>A</sup>	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia											
Límite líquido	...		...	B				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		N.P.	B				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. <sup>B</sup>
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

<sup>A</sup> La colocación de A3 antes de A2 en el proceso de eliminación de izquierda a derecha no necesariamente indica superioridad de A3 sobre A2.

<sup>B</sup> El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor que LL-30. El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL-30.

fuelle. Das Braja M., and Sergio R. 1

#### 4.2.3.2. Propiedades Índice.

Se da a conocer propiedades índices de suelos y su objetivo:

<sup>17</sup> Das, Braja M., and Sergio R. Cervantes González. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Thomson Learning, 2001.

- **Humedad.**

Según Das, “el contenido de humedad en el suelo, es la cantidad de agua que está presente en el suelo cuando se va a tratar con él”<sup>18</sup>.

Según Juárez, “los suelos tienen tres tipos de fases, líquida que es el porcentaje de agua, la sólida que es el contenido de mineral y la parte gaseosa que es el contenido de agua presente en el suelo”<sup>19</sup>.

- **Gravedad específica.**

Según Berry & Reid, “la gravedad específica del suelo es, una relación existente entre la densidad del suelo y la densidad del agua, este valor se da adimensional con un fin de dar una categorización al suelo, este valor es sumamente especial ya que intervienen en la mayoría de los cálculos provenientes de la mecánica de suelos interviene en la mayor parte de los cálculos de la Mecánica de Suelos, como la relación de vacíos, peso unitario y demás aspectos intrínsecos del material”<sup>20</sup>.

- **Análisis granulométrico.**

López define que el análisis granulométrico:

Es parte de suma importancia debido a que, por una parte, nos separa el material grueso del material fino, además de eso nos da las características del tamaño de las partículas que contiene el material y esto a su vez nos da un estudio del comportamiento mecánico. El comportamiento de la estabilidad en un suelo depende de su organización interna entre partículas (relación de vacíos), para lograr la mayor eficacia en este sentido se debe tener una granulometría adecuada que cumpla con los requerimientos necesarios, llenando así el vacío existente entre partículas. Esta prueba granulométrica se basa por medio de un tamizado, y para las partículas muy finas se utiliza un método de hidrometría, basado en la ley de Stokes<sup>21</sup>.

- **Límites de consistencia de los suelos.**

Según Crespo:

---

<sup>18</sup> Das, Braja M., and Sergio R. Cervantes González. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Thomson Learning, 2001.

<sup>19</sup> Badillo, Eulalio Juárez. *Mecánica de suelos*. Vol. 2. Editorial Limusa, 2001.

<sup>20</sup> Berry, Peter L., and David Reid. *Mecánica de suelos*. McGraw-Hill, 1993.

<sup>21</sup> Ulloa López, Horacio. *Estabilización de suelos cohesivos por medio de Cal en las Vías de la comunidad de San Isidro del Pegón, municipio Potosí-Rivas*. Diss. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, 2015.

Los límites de Atterberg o límites de consistencia en los suelos finos se basan en que los suelos finos pueden encontrarse en diferentes estados dependiendo de varios factores, como el contenido de agua principalmente, y de esta forma un suelo puede encontrarse en estado sólido, semisólido, plástico, semilíquido o líquido. Un ejemplo claro es la arcilla que al adicionar agua puede pasar de un estado sólido a plástico o inclusive a líquido. el contenido de agua es interesante para conocer su rango de humedad y saber así su rango de humedad presente en el material<sup>22</sup>.

- **Límite Líquido (LL).**

Según Crespo, “el límite líquido se expresa como el contenido de humedad en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra, existente en un suelo moldeado para una muestra del mismo en que se haya moldeado una ranura de dimensiones Estándar, al someterla al impacto de 25 golpes bien definidos se cierre sin resbalar en su apoyo”<sup>23</sup>.

- **Límite Plástico (LP).**

Según Crespo, “el límite plástico se define como el contenido de humedad, expresado en porcentaje, cuando comienza agrietarse un rollo formado con el suelo de 3 mm. De diámetro, al rodarlo con la mano sobre una superficie lisa y absorbente”<sup>24</sup>.

- **Límite de concentración.**

Según Crespo, “el límite de concentración (LC) es el porcentaje de humedad con respecto al peso seco de una muestra, con el cual una reducción de agua no ocasiona ya disminución en el volumen del suelo”<sup>25</sup>.

- **Índice de plasticidad (IP).**

Según Crespo, “el Índice de Plasticidad (IP) es la medida del agua que puede absorber un suelo antes de convertirse en un solución o disolución. La relación indica que entre más alto sea el número el material es más plástico y mucho más débil”<sup>26</sup>.

#### **4.2.3.3. Pruebas de Resistencia.**

- **Resistencia Esfuerzo Cortante.**

Berry & Reid nos dicen que:

---

<sup>22</sup> Villalaz, Carlos Crespo. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Editorial Limusa, 2004.

<sup>23</sup> *Ibíd.*

<sup>24</sup> *Ibíd.*

<sup>25</sup> *Ibíd.*

<sup>26</sup> *Ibíd.*

Una parte fundamental de mecánica en suelos, es determinar la resistencia dada al esfuerzo cortante en los suelos. Es imprescindible contar con este concepto al tratar de aplicar la mecánica de suelos al análisis de estabilidad de obras civiles. En teoría la resistencia al esfuerzo cortante en los suelos está dada por, el ángulo de fricción interna  $\phi$  en los materiales 100% granulares y por la cohesión  $c$ , en los suelos puramente cohesivos (arcillas homogéneas), la cual depende de la humedad del suelo, sin embargo, en la mayoría de los suelos la resistencia al esfuerzo cortante está dada por la combinación de ambos parámetros. [...]existen principalmente dos métodos experimentales para determinar la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, las pruebas de compresión (triaxial y simple) y de corte directo, las pruebas triaxiales, son actualmente la más utilizadas, ya que permiten controlar y medir las presiones actuantes en tres direcciones. El espécimen es colocado en una cámara hermética y confinado mediante una membrana plástica, las presiones laterales se ejercen mediante un líquido a presión que llena la cámara, y la presión axial mediante un vástago metálico que comprime la muestra a velocidad constante. Las pruebas se dividen en tres tipos, que tratan de representar los distintos factores circunstanciales que influyen en la resistencia al corte del suelo: la prueba consolidada-drenada o lenta (L), la prueba consolidada no drenada o consolidada rápida (Rc), y la prueba no consolidada-no drenada o rápida (R)<sup>27</sup>.

- **Variación Volumétrica.**

Según Berry & Reid:

Varios suelos tienden a expandirse o contraerse por los cambios en el contenido de humedad y en contenido de aire entre los poros. Las presiones de expansión se desarrollan debido a incrementos en la humedad, los cuales deben de ser controlados, ya que estas presiones pueden levantar pavimentos, inclinar postes, fracturar muros, romper tubos de drenaje, etc.; por lo cual, es de suma importancia detectar los suelos expansivos, su composición y el tratamiento más adecuado a seguir para evitar dichos problemas<sup>28</sup>.

Este ensayo se realizó para hallar la humedad y densidad optima de cada una de las concentraciones.

- **Corte Directo.**

Según Berry & Reid:

---

<sup>27</sup> Berry, Peter L., and David Reid. *Mecánica de suelos*. McGraw-Hill, 1993.

<sup>28</sup> *Ibíd.*

Este ensayo se desarrolla colocando una muestra del suelo en sus condiciones in situ, en una máquina de corte directo, luego aplicar un esfuerzo normal que se determina con anterioridad, someter la muestra a una condición de humedad y drenar el espécimen de ensayo, consolidar el espécimen bajo el esfuerzo normal, , y desplazar horizontalmente una mitad respecto de la otra a una velocidad constante de deformación, mientras se miden la fuerza de corte y los desplazamientos normales y horizontales. teniendo en cuenta que la velocidad de corte debe ser considerablemente lenta. En la investigación obtenemos la resistencia al corte, con sus propiedades tanto de cohesión y ángulo de fricción de las mezclas de suelo con los aditivos<sup>29</sup>.

Este ensayo se realizó para calcular el ángulo de fricción y la cohesión de cada una de las concentraciones, para después poder compararlas.

- **Compresión Inconfinada.**

Según Berry & Reid, “este método de ensayo es aplicable solo a materiales cohesivos que no expulsan agua durante la etapa de carga del ensayo y que mantienen su resistencia intrínseca después de remover las presiones de confinamiento, como las arcillas o los suelos cementados. Los suelos secos y friables, los materiales fisurados o estratificados, los limos, las turbas y las arenas no se pueden analizar por este método para obtener valores válidos de la resistencia a la compresión inconfinada”<sup>30</sup>.

Este ensayo se realizó para calcular la carga ultima que cada concentración era capaz de soportar.

- **Consolidación.**

Según Berry & Reid:

En estas pruebas de laboratorio, se toma una muestra de suelo, se confina lateralmente y se carga en dirección axial con incrementos de esfuerzo total. Cada incremento de carga se mantiene constante hasta cuando el exceso de presión de poros se haya disipado. Esta situación se identifica por medio de la interpretación del comportamiento tiempo-deformación bajo esfuerzo total constante y se basa en la premisa de que el suelo está 100 % saturado. Durante el ensayo se mide el cambio de altura de la muestra y se determina la relación entre el esfuerzo axial efectivo y la relación de vacíos o la deformación unitaria. Cuando se toman las lecturas de tiempo-deformación durante la aplicación de un incremento de carga, se puede calcular la velocidad de consolidación con el coeficiente de consolidación<sup>31</sup>.

---

<sup>29</sup> Berry, Peter L., and David Reid. *Mecánica de suelos*. McGraw-Hill, 1993.

<sup>30</sup> *Ibíd.*

<sup>31</sup> Berry, Peter L., and David Reid. *Mecánica de suelos*. McGraw-Hill, 1993.

Este ensayo se le realizo a la concentración de 100% caolín, para calcular el tiempo y la carga con la que las concentraciones llegarían al 90% de su densidad optima.

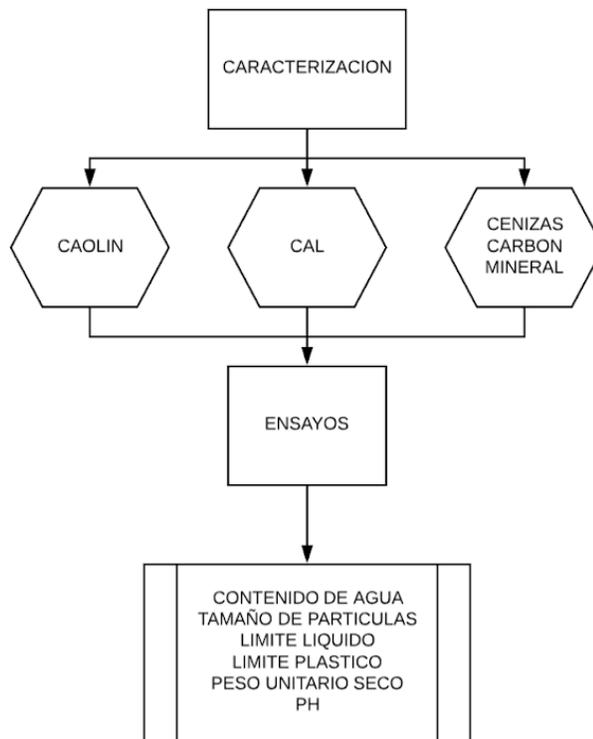
## 5. Capítulo 3.

### 5.1. Metodología

Se pretende alcanzar los objetivos de la investigación mediante la realización de la estabilización de un suelo arcilloso, específicamente un caolín. En la planificación se prevé 3 etapas a desarrollar en donde se encuentran: etapa 1, caracterización de los materiales; etapa 2, suelo base; y etapa 3, mejoramiento del suelo. La investigación se llevó a cabo durante un periodo de seis meses incluyendo tres meses dedicado al análisis y la difusión de datos.

#### 5.1.1. Etapa 1: Caracterización de los Materiales.

*Ilustración 1. Flujograma Caracterización del Material.*



*Fuente. propia*

Como se observa en la ilustración 1, debido al uso de diferentes materiales y la mezcla de los mismos, en la primera etapa se realizaron los laboratorios pertinentes a la caracterización de cada uno de ellos, estos laboratorios fueron los siguientes, que se encuentran en la sección 100<sup>32</sup> de la norma INVIAS y se listan en las siguientes subsecciones.

#### **5.1.1.1. Laboratorio de determinación de humedad.**

La norma I.N.V.E – 122. Determinación en el Laboratorio del Contenido de Agua (Humedad) de Muestras de Suelo, Roca y Mezclas de Suelo – Agregado dice que:

Esta norma se refiere a la determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad), por masa, de suelo, roca, y mezclas de suelo-agregado. Por simplicidad, de aquí en adelante, la palabra "material" se refiere a suelo, roca o mezclas de suelo-agregado, la que sea aplicable.

Se lleva una muestra del material húmedo a un horno a  $110 \pm 5^\circ \text{C}$  ( $230 \pm 9^\circ \text{F}$ ) y se seca hasta alcanzar una masa constante. Se considera que la masa perdida a causa del secado es agua y que la masa remanente corresponde a la muestra seca. El contenido de agua se calcula relacionando la masa de agua en la muestra húmeda con la masa de la muestra seca<sup>33</sup>.

#### **5.1.1.2. Laboratorio de granulometría.**

La norma I.N.V.E – 123. Determinación de los Tamaños de las Partículas de los Suelos nos dice que, “Esta norma se refiere a la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas de un suelo. La distribución de las partículas mayores de  $75 \mu\text{m}$  (retenidas en el tamiz No. 200) se determina por tamizado, mientras que la distribución de los tamaños de las partículas menores de  $75 \mu\text{m}$  se determina por un proceso de sedimentación empleando un hidrómetro”<sup>34</sup>.

#### **5.1.1.3. Laboratorio de límite líquido.**

La norma I.N.V.E – 125. Determinación del Límite Líquido de los Suelos nos dice:

Esta norma se refiere a la determinación del límite líquido de los suelos. Se procesa la muestra de suelo para remover cualquier porción retenida en el tamiz de  $425 \mu\text{m}$  (No. 40). El límite líquido se determina mediante tanteos, en los cuales una porción de la muestra se esparce sobre una cazuela de bronce que se divide en dos partes con un ranurador, permitiendo que esas dos partes fluyan como resultado de los golpes recibidos por la caída repetida de la

---

<sup>32</sup> INVIAS, IN. "Normas de Ensayo de materiales para carreteras." *INV E* (2013).

<sup>33</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. *Determinación en el Laboratorio del Contenido de Agua (Humedad) de Muestras de Suelo, Roca y Mezclas de Suelo – Agregado*: I.N.V. E– 122–13. [En línea]. Disponible en Internet:< <https://es.scribd.com/document/363328883/INV-E-122-13-pdf>>. [Citado: 5, nov., 2019].

<sup>34</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. *Determinación de los Tamaños de las Partículas de los Suelos*: I.N.V. E– 123–13. [En línea]. Disponible en Internet:< <https://es.scribd.com/document/363328885/INV-E-123-13-pdf> >. [Citado: 5, nov., 2019].

cazuela sobre una base normalizada. El límite líquido multipunto, Método A, requiere 3 o más tanteos sobre un rango de contenidos de agua, cuyos resultados se dibujan para establecer una relación a partir de la cual se determina el límite líquido. El método de un punto, Método B, usa los datos de dos tanteos realizados con un solo contenido de agua, multiplicado el valor obtenido por un factor de corrección<sup>35</sup>.

#### **5.1.1.4. Laboratorio límite plástico e índice de plasticidad.**

La norma I.N.V.E – 126. Límite Plástico e Índice de Plasticidad de los Suelos dice que:

Esta norma de ensayo se refiere a la determinación del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos.

El límite plástico se determina presionando de manera repetida una pequeña porción de suelo húmedo, de manera de formar rollos de 3.2 mm (1/8") de diámetro, hasta que su contenido de agua se reduce a un punto en el cual se produce el agrietamiento y/o desmoronamiento de los rollos. El límite plástico es la humedad más baja con la cual se pueden formar rollos de suelo de este diámetro, sin que ellos se agrieten o desmoronen.

El índice de plasticidad se calcula sustrayendo el límite plástico del límite líquido<sup>36</sup>.

#### **5.1.1.5. Laboratorio de gravedad específica.**

La norma I.N.V.E – 128. Determinación de la Gravedad Específica de las Partículas Sólidas de los Suelos y de la Llenante Mineral, Empleando un Picnómetro con Agua nos dice:

Esta norma de ensayo se utiliza para determinar la gravedad específica de los suelos que pasan el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y de la llenante mineral de las mezclas asfálticas (filler), empleando un picnómetro.

La norma incluye dos métodos para determinar la gravedad específica. El método por utilizar deberá ser especificado por el cliente

Método A –Este es el método preferido y se deberá emplear obligatoriamente para el ensayo de los siguientes tipos de suelos: suelos finos altamente plásticos; suelos tropicales y suelos que contengan haloisita.

Método B – Es el procedimiento descrito para el ensayo de muestras secas<sup>37</sup>.

---

<sup>35</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. *Determinación del Límite Líquido de los Suelos*: I.N.V. E–125–13. [En línea]. Disponible en Internet:< <https://es.scribd.com/document/357714804/INV-E-125-2013> >. [Citado: 5, nov., 2019].

<sup>36</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. *Límite Plástico e Índice de Plasticidad de los Suelos*: I.N.V. E–126–13. [En línea]. Disponible en Internet:< <https://es.scribd.com/document/363328895/INV-E-126-13-pdf> >. [Citado: 5, nov., 2019].

<sup>37</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. *Determinación de la Gravedad Específica de las Partículas Sólidas de los Suelos y de la Llenante Mineral, Empleando un Picnómetro con Agua*: I.N.V. E–128–13. [En línea]. Disponible en Internet:< <https://es.scribd.com/document/363328898/INV-E-128-13-pdf> >. [Citado: 5, nov., 2019].

### 5.1.1.6. Laboratorio de Ph. I.N.V.E – 131. Ph de los Suelos.

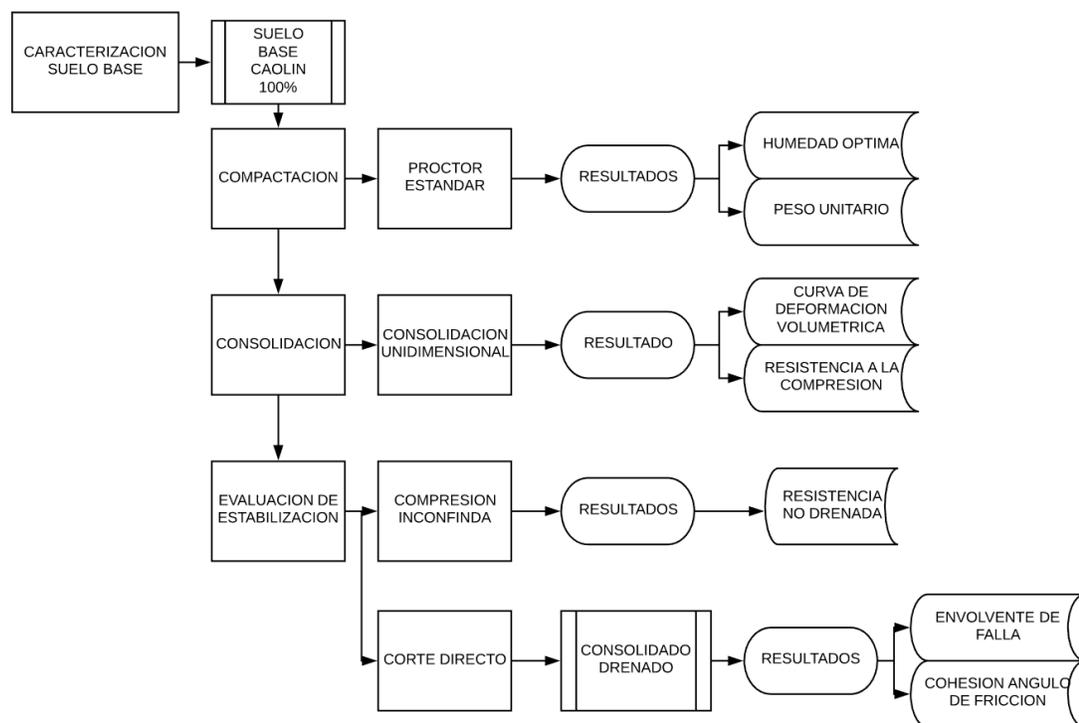
La norma I.N.V.E – 131. nos dice que:

Esta norma de ensayo cubre la determinación del pH de los suelos, para usos diferentes de los relacionados con la corrosión. Esta determinación se aplica en campos tales como el agrícola, el ambiental y el de recursos naturales.

Se hacen medidas del pH de los suelos en ambas suspensiones (en agua y en una solución de cloruro de calcio) con un potenciómetro que tiene un sistema de electrodos sensibles al pH (Método A) o usando un papel sensible (Método B). El potenciómetro se calibra con soluciones amortiguadoras (buffer) de pH conocido. El Método B es menos preciso y se debe usar únicamente para hacer un estimativo aproximado del pH del suelo. Siempre se deberá usar el método A, salvo que se especifique lo contrario<sup>38</sup>.

### 5.1.2. Etapa 2: Suelo Base.

Ilustración 2. Flujograma Suelo Base.



Fuente. propia

Como se observa en la ilustración 2, después de obtener las características físicas del caolín (Etapa 1), se procedió a obtener las características mecánicas del mismo,

<sup>38</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. *Ph de los Suelos*: I.N.V. E– 131–07. [En línea]. Disponible en Internet:< <file:///C:/Users/juand/Desktop/897-e-131.pdf> >. [Citado: 5, nov., 2019].

para comparar estas características con las características que se obtuvieron de las diferentes mezclas del caolín con agregados, para hallar estas propiedades se realizaran los siguientes laboratorios, que se encuentran en la sección 100 de la norma INVIAS<sup>39</sup> y se explican a continuación.

#### **5.1.2.1. Laboratorio relación de humedad.**

La norma I.N.V.E – 141. Relaciones Humedad – Peso Unitario Seco en los Suelos (Ensayo Normal de Compactación) nos dice que:

Los siguientes métodos de ensayo se emplean para determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco de los suelos.

Se coloca en tres capas una muestra de suelo, con una humedad de moldeo seleccionada, dentro de un molde, sometiendo cada capa a 25 o 56 golpes de un martillo de 24.5 N (5.5 lbf) que cae desde una altura de 305 mm (12"), produciendo una energía de compactación aproximada de 600 kN-m/m<sup>3</sup> (12 400 lbf-pie/pie<sup>3</sup>).

Se determina el peso unitario seco resultante. El procedimiento se repite con un número suficiente de humedades de moldeo, para establecer una curva que relacione las humedades con los respectivos pesos unitarios secos obtenidos.

Esta curva se llama curva de compactación y su vértice determina la humedad óptima y el peso unitario seco máximo, para el ensayo normal de compactación<sup>40</sup>.

#### **5.1.2.2. Laboratorio de consolidación.**

La norma I.N.V.E – 151. Consolidación Unidimensional de Suelos nos dice que:

Esta norma describe el procedimiento para determinar la magnitud y la velocidad de consolidación de muestras de suelos mediante una prueba de laboratorio en la cual se permite el drenaje axial de especímenes confinados lateralmente, mientras se someten a incrementos de carga con esfuerzo controlado. Para la ejecución del ensayo se puede seguir uno de los siguientes métodos:

Método A – Este método se desarrolla aplicando de manera constante cada incremento de carga durante veinticuatro (24) horas o múltiplos de este tiempo. Las lecturas tiempo-deformación se deben realizar, como mínimo, durante dos incrementos de carga. Este método proporciona solamente la curva de compresión de la muestra y los resultados combinan las deformaciones debidas a consolidación primaria y a consolidación secundaria.

Método B – Por este método, las lecturas de tiempo-deformación se hacen para todos los incrementos de carga. Los incrementos de carga se aplican: (a) después de alcanzado el 100 % de la consolidación primaria, o (b) a incrementos constantes de tiempo, como se describe en el método A. Como resultados, se obtienen la curva de compresión con datos explícitos para definir los datos

---

<sup>39</sup> INVIAS, IN. "Normas de Ensayo de materiales para carreteras." *INV E* (2013).

<sup>40</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. *Relaciones Humedad – Peso Unitario Seco en los Suelos (Ensayo Normal de Compactación)*: I.N.V. E– 141–13. [En línea]. Disponible en Internet:< <https://es.scribd.com/document/363328920/INV-E-141-13-pdf> >. [Citado: 5, nov., 2019].

correspondientes a la consolidación secundaria, el coeficiente de consolidación para materiales saturados y la velocidad de la compresión secundaria<sup>41</sup>.

### **5.1.2.3. Laboratorio de compresión inconfiada.**

La norma I.N.V.E – 152. Compresión Inconfiada en Muestras de Suelos nos dice que:

Esta norma describe el ensayo para determinar la resistencia a la compresión no confinada de suelos cohesivos, mediante la aplicación de una carga axial con control de deformación. El ensayo se puede realizar sobre muestras inalteradas, remodeladas o compactadas.

Este método de ensayo da un valor aproximado de la resistencia de los suelos cohesivos en términos de esfuerzos totales.

Este método de ensayo es aplicable solo a materiales cohesivos que no expulsan agua durante la etapa de carga del ensayo y que mantienen su resistencia intrínseca después de remover las presiones de confinamiento, como las arcillas o los suelos cementados. Los suelos secos y friables, los materiales fisurados o estratificados, los limos, las turbas y las arenas no se pueden analizar por este método para obtener valores válidos de la resistencia a la compresión inconfiada<sup>42</sup>.

### **5.1.2.4. Laboratorio de corte directo.**

La norma. I.N.V.E – 154. Ensayo de Corte Directo en Condición Consolidada Drenada (CD) nos dice que, “Esta norma tiene por objeto establecer el procedimiento de ensayo para determinar la resistencia al corte de una muestra de suelo consolidada y drenada, empleando el método de corte directo. La prueba se lleva a cabo deformando una muestra a velocidad controlada, cerca de un plano de corte determinado por la configuración del aparato de ensayo”<sup>43</sup>.

---

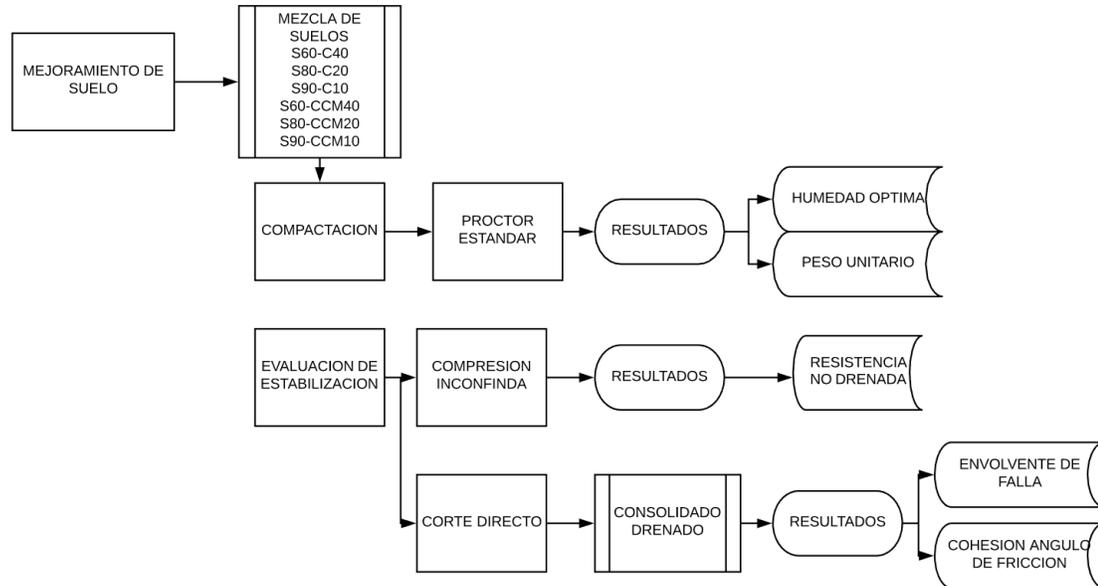
<sup>41</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. *Consolidación Unidimensional de Suelos*: I.N.V. E– 151–13. [En línea]. Disponible en Internet:< <https://es.scribd.com/document/363328939/INV-E-151-13-pdf> >. [Citado: 5, nov., 2019].

<sup>42</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. *Compresión Inconfiada en Muestras de Suelos*: I.N.V. E– 152–13. [En línea]. Disponible en Internet:< <https://es.scribd.com/document/363328938/INV-E-152-13-pdf> >. [Citado: 5, nov., 2019].

<sup>43</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. *Ensayo de Corte Directo en Condición Consolidada Drenada (CD)*: I.N.V. E– 154–13. [En línea]. Disponible en Internet:< <https://es.scribd.com/document/357714085/INV-E-154-2013> >. [Citado: 5, nov., 2019].

### 5.1.3. Etapa 3: Mejoramiento del Suelo.

Ilustración 3. Flujograma Mejoramiento del Suelo.



Fuente. propia

Como se observa en la ilustración 3, luego de que se obtuvieron los datos de la etapa 2, se procedió a hacer la mezcla del suelo con los aditivos en sus diferentes concentraciones, estas dosificaciones son tan altas debido a que en muchas partes en las que hay un volcán cerca, el suelo presenta concentraciones altas de cenizas, entonces para tener un punto de comparación se tomaron igual de altas las concentraciones de cal. Posterior a esto se realizó pruebas mecánicas para poder observar el comportamiento de cada una de estas mezclas, los laboratorios que se realizaron fueron los mismo que se hicieron en la etapa 2, exceptuando el ensayo de consolidación.

## 5.2. Limitaciones

Se presenta a continuación las restricciones que se sujeta en la realización del estudio:

- La investigación presente es un estudio plenamente superficial enfocado en un mejoramiento de suelo, tomando como único suelo base el caolín.
- Las características físico mecánicas del suelo arcilloso (caolín) mediante la adición de cal y cenizas de carbón.
- Se realizaron únicamente pruebas de laboratorio que evalúan el comportamiento de las mezclas ante la aplicación de cargas fijas.

- La determinación del porcentaje requerido de estabilizante.

## **6. Capítulo 4. Caracterización del Suelo Base.**

### **6.1. Lugar de Extracción del Suelo.**

Suelo Base: Caolín Corona.

El caolín es un polvo de naturaleza arcillosa, estable químicamente. Sus principales características son un peso específico alrededor de 2,6, color blanco, un brillo terroso mate, absorbe con gran facilidad agua, es inodoro, moldeable en presencia de una gran humedad, no es tóxico ni abrasivo, con fácil disponibilidad en el mercado. El nombre químico del compuesto es silicato de aluminio, en el sector de la construcción este material es útil en la fabricación de estucos, por su aporte en la plasticidad y secado entre capas, corona presenta el producto en un bulto por peso aproximado de 25 kilogramos, tiene una vida útil de 2 años desde su fabricación, siempre y cuando se conserve en un ambiente seco y en su empaque original.

### **6.2. Características Físicas.**

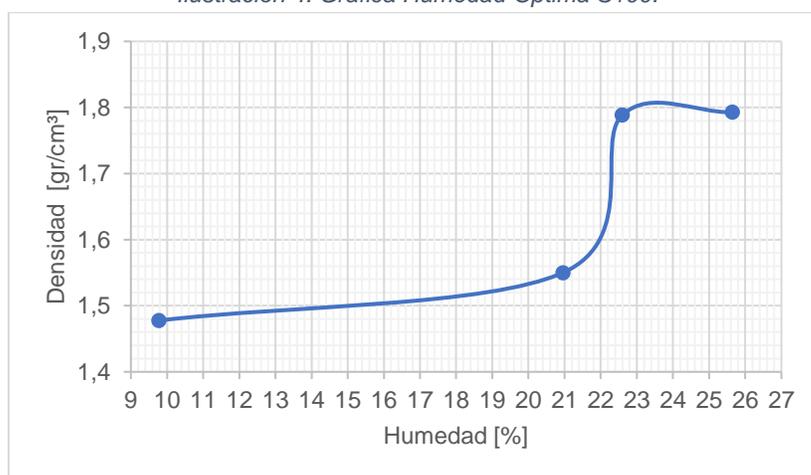
Las características físicas dadas por el proveedor (Corona) nos indica las siguientes especificaciones.

- Residuo sobre malla 200 Max. 12%
- Humedad Max. 3,5%

### 6.3. Densidad Máxima y Humedad Óptima.

La densidad máxima y humedad óptima del suelo natural se obtuvo mediante el ensayo de proctor estándar, según las especificaciones de la norma I.N.V.E - 122. Este ensayo es adecuado para la determinación de estas dos características del suelo en su relación de densidad y humedad, del suelo base compactado en un molde estandarizado, con parámetros fijos como lo es la energía de compactación. Se realizó el ensayo obteniendo los resultados de la ilustración 4. La máxima densidad seca para este esfuerzo de compactación alcanzó  $1,81 \text{ gr/cm}^3$  y una humedad óptima de  $22,59\%$ . Como se aprecia en la ilustración 4.

Ilustración 4. Gráfica Humedad Óptima S100.



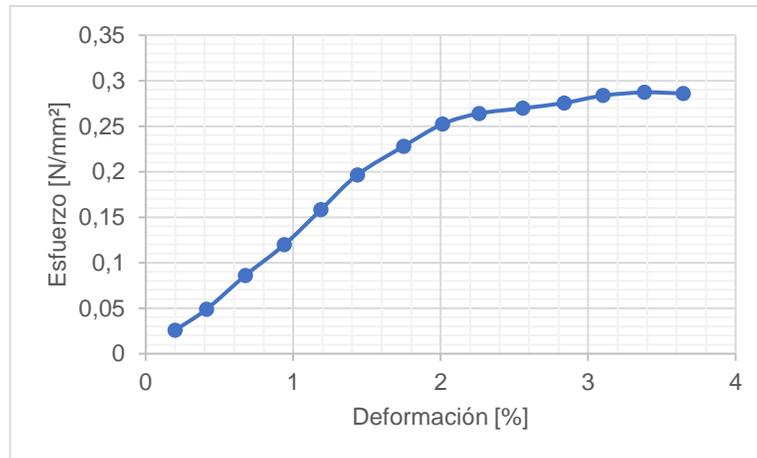
Fuente. propia

## 6.4. Compresión Inconfinada

Tabla 2. Dimensiones Cilindro Compresión Inconfinada S100.

Diámetro [mm]	Altura [mm]	Peso [gr]	Área [mm <sup>2</sup> ]	Volumen [mm <sup>3</sup> ]
33,09	60,62666667	84,67	859,9702268	52137,12828

Ilustración 5. Grafica Deformación vs. Esfuerzo S100.

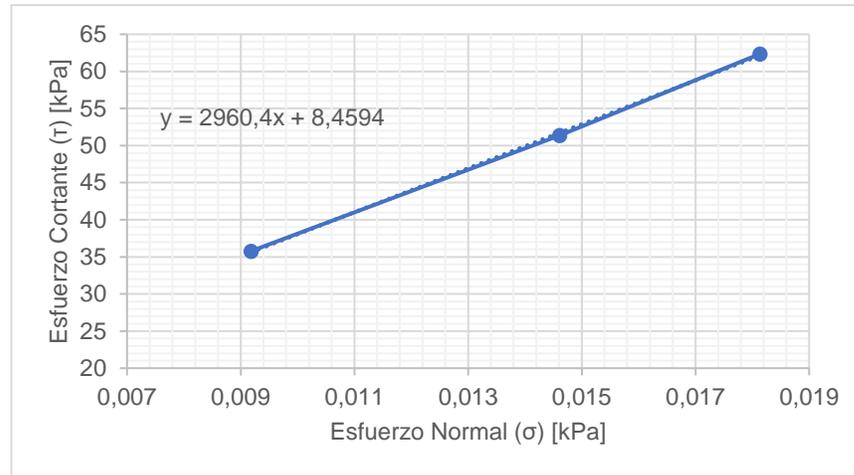


Fuente. propia

Como se observa en la ilustración 5, se determina que el esfuerzo máximo es de 0.287 (N/mm<sup>2</sup>).

## 6.5. Corte Directo.

Ilustración 6. Envolvente Corte Directo S100.



Fuente. propia

Tabla 3. Resultados Corte Directo S100.

<b>RESULTADOS</b>	
<b>Pendiente</b>	3117,350606
<b>Angulo de Fricción (<math>\phi</math>)</b>	46,3
<b>Cohesión (c) [kPa]</b>	8,5

El suelo base (Caolín) presenta condiciones normales en lo estandarizado para consideración de este como una arcilla, evidenciado en la tabla 3.

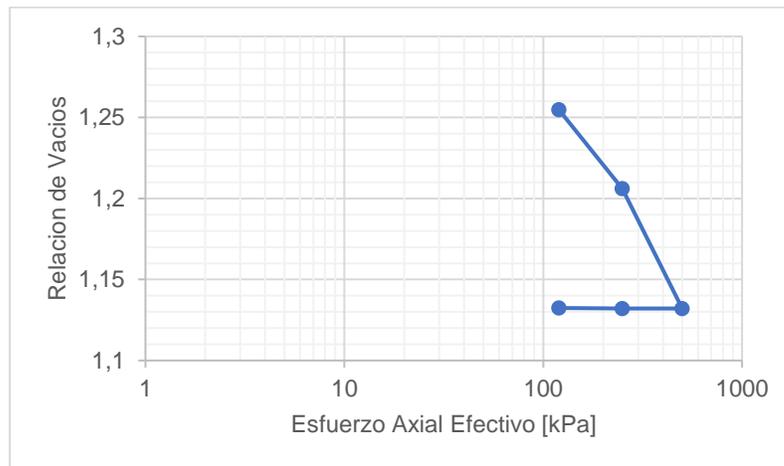
## 6.6. Consolidación Unidimensional.

Tabla 4. Resumen Consolidación Unidimensional S100.

Incremento de Carga	Tiempo [min]	Raíz Tiempo	Esfuerzo Axial Total [kPa]	Esfuerzo Axial Efectivo [kPa]	Deformación [mm]
Asiento	0	0,000	0	0	0,000
1	1140	33,764	12	120	0,203
2	2280	47,749	25	250	0,610
3	3420	58,481	50	500	1,228
4	4560	67,528	25	250	1,228
5	5700	75,498	12	120	1,226

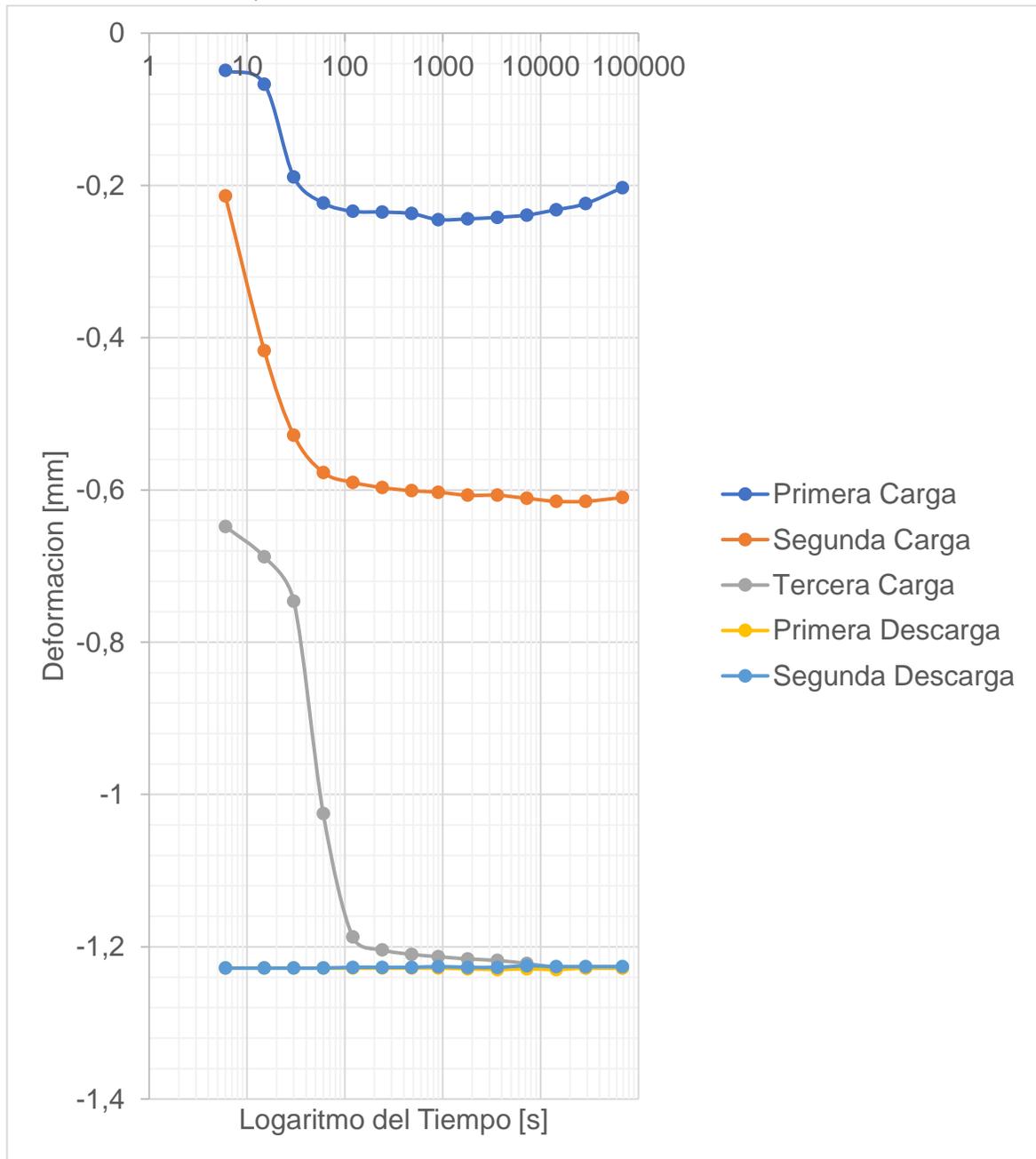
Fuente. propia 1

Ilustración 7. Grafica Esfuerzo vs. Relación de Vacíos S100.



Fuente. propia

Ilustración 8. Grafica Tiempo vs Deformación



Fuente. propia

## 6.7. Ph del Suelo

Según la norma I.N.V.E. 131 se considera el suelo base como ácido dando este como resultado un Ph de 5,51.

## **7. Capítulo 5. Caracterización de los Aditivos**

### **7.1. Caracterización de la Cal.**

#### **7.1.1. Lugar de Extracción de la Cal.**

Cal: Cal Hidratada.

esta cal está elaborada calcinando e hidratando mármol calcítico, bajo un control de calidad para cumplir la norma N e la AMERICAN SOCIETY, este material es usado en el sector de la construcción para recubrimientos de superficies tanto interiores como exteriores, también para prefabricados de cemento, madera, ladrillo, tejas, entre otros materiales para la fabricación de pinturas.

#### **7.1.2. Composición Química.**

Su composición química dada por el proveedor se presenta a continuación:

Óxido de Calcio Min. 45.0%

Óxido de Magnesio Max 26.0%

Hidróxido de Calcio Min. 60.0%

Hidróxidos Totales Min. 80.0%

Residuos Insolubles Máx. 1.8%

Humedad Máx. 0.5%

Dióxido de Carbono Max. 2.5%

#### **7.1.3. Granulometría de la Cal.**

La granulometría dada por el proveedor es la siguiente:

Máximo residuo retenido en malla 30 0.50%

Máximo residuo retenido en malla 200 15.0%

#### 7.1.4. Preparación de la Cal Como Material Estabilizante.

La preparación de cal como material estabilizante se rigió bajo los siguientes parámetros utilizando la concentraciones y símbolos correspondientes indicados en la tabla 5.

Tabla 5. Preparación de la Cal.

Material	% de Caolín	% de Cal	Símbolo
Suelo	100	0	S
Cal	0	100	C
Mezcla 1	60	40	S60-C40
Mezcla 2	80	20	S80-C20
Mezcla 3	90	10	S90-C10

Fuente. propia

## 7.2. Caracterización de las Cenizas.

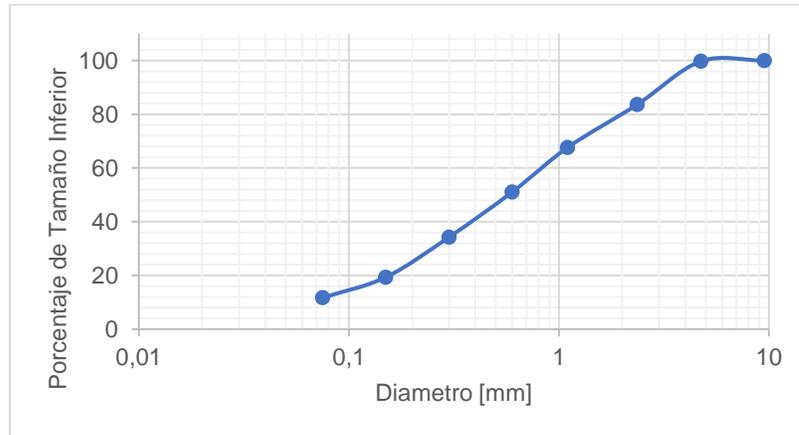
### 7.2.1. Lugar de Extracción de las Cenizas.

El mayor centro de recaudo de carbón coque al alcance se encuentra ubicado sobre la zona carbonífera de Cundinamarca precisamente en la cordillera oriental, las cenizas de carbón se obtuvieron parte de la empresa La Leñería que maneja carbón mineral, vegetal y bioetanol como combustible. El procedente del carbón mineral esta mencionado anteriormente, este material asemeja las condiciones requeridas para efectuarse como cenizas volantes de carbón mineral coque. En la zona central existe una gran variedad de tipos de carbones como lo son los semiantracíticos y carbones términos con un bajo contenido de otros minerales y alto poder calorífico.

Los contenidos de cenizas volantes de carbón mineral se obtuvieron después del procedimiento térmico semejando una termoeléctrica dando como residuo las cenizas volantes.

### 7.2.2. Granulometría de las Cenizas.

Ilustración 9. Grafica Curva Granulométrica.



Fuente. propia

Según lo mostrado en la ilustración se evidencia que las cenizas tratadas, se encuentran entre el tamiz N°8 y el tamiz N°100, un tamaño superior a lo normalizado para una ceniza volante.

### 7.2.3. Preparación de las Cenizas Como Material Estabilizante

La preparación de las cenizas como material estabilizante se rigió bajo los siguientes parámetros utilizando la concentraciones y símbolos correspondientes indicados en la tabla 6.

Tabla 6. Preparación de las Cenizas.

Material	% de Caolín	% de Ceniza	Símbolo
Suelo	100	0	S
Cenizas de Carbón Mineral	0	100	C
Mezcla 4	60	40	S60-CCM40
Mezcla 5	80	20	S80-CCM20
Mezcla 6	90	10	S90-CCM10

Fuente. propia

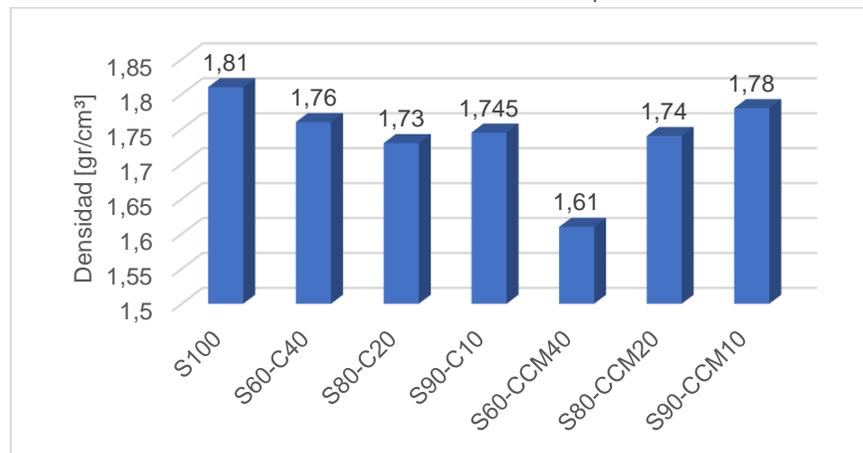
## 8. CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN DEL SUELO.

### 8.1. Resultados

#### 8.1.1. Humedad Óptima – Densidad.

Se observa que la muestra con el mayor grado de compactación corresponde al suelo S100 el cual no lleva ningún aditivo adicional. La que menor densidad logra es la mezcla S60-CCM40 debido a la gran cantidad de cenizas que posee.

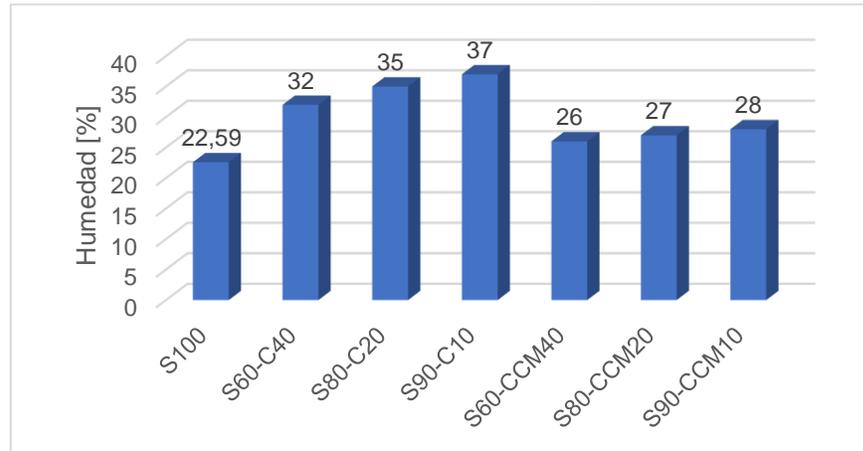
Ilustración 10. Grafica Densidad Óptima.



Fuente. propia

Debido a las condiciones que presenta la cal se observa en la ilustración numero 11 que las humedades optimas son mayores a las del suelo base y a las de su equivalente en su ceniza, así mismo las condiciones de las cenizas elevan la humedad de la mezcla con respecto a el suelo base.

Ilustración 11. Grafica Humedad Óptima.



Fuente. propia

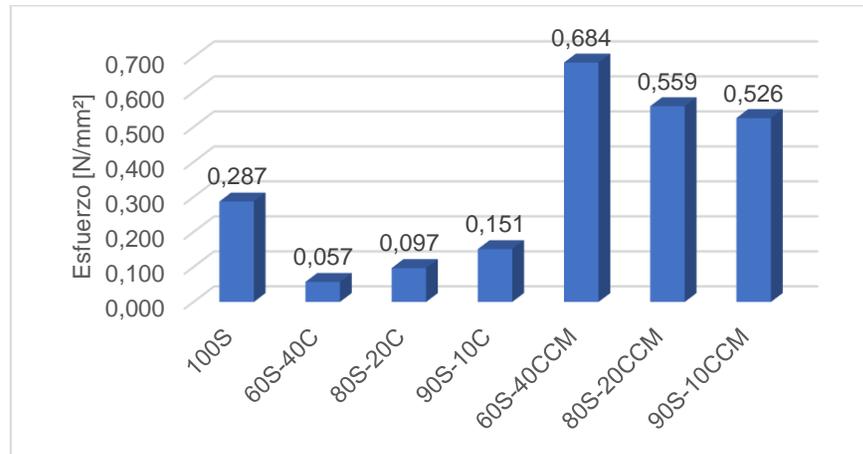
### 8.1.2. Compresión Inconfinada.

Tabla 7. Resumen Laboratorios Compresión Inconfinada.

Mezcla	Carga (N)	Deformación Unitaria ( $\epsilon_1$ ) [%]	Esfuerzo [N/mm <sup>2</sup> ]
100S	247	3,381350341	0,287122127
60S-40C	50	1,054564533	0,057262755
80S-20C	86	1,243894127	0,096934772
90S-10C	135	1,487549854	0,151065088
60S-40CCM	622	4,56691055	0,684170845
80S-20CCM	485	2,853828306	0,559426905
90S-10CCM	452	2,619769557	0,525673691

Fuente. propia 2

Ilustración 12. Grafica Esfuerzo Máximo.



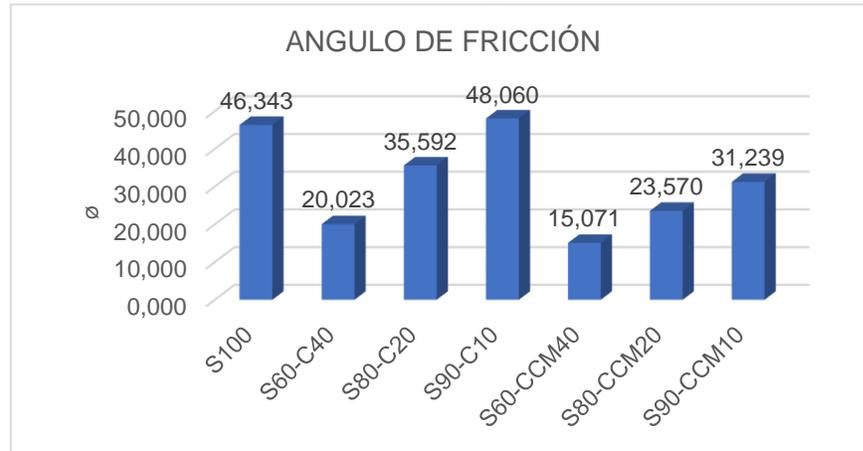
Fuente. propia

Debido a las concentraciones tan elevadas de cal no se optime un resultado favorable a comparación de los resultados obtenidos con las mismas concentraciones en cenizas como se contempla en la ilustración 12.

### 8.1.3. Corte Directo.

El ángulo de fricción de las muestras se ve afectado debido a diferentes factores como lo son, la densidad, el tamaño y la forma de los granos en nuestras mezclas. Todo esto se evidencia en la ilustración 13 ya que las características físicas y los porcentajes de concentración de los materiales estabilizantes, afectan directamente los factores anteriormente mencionados.

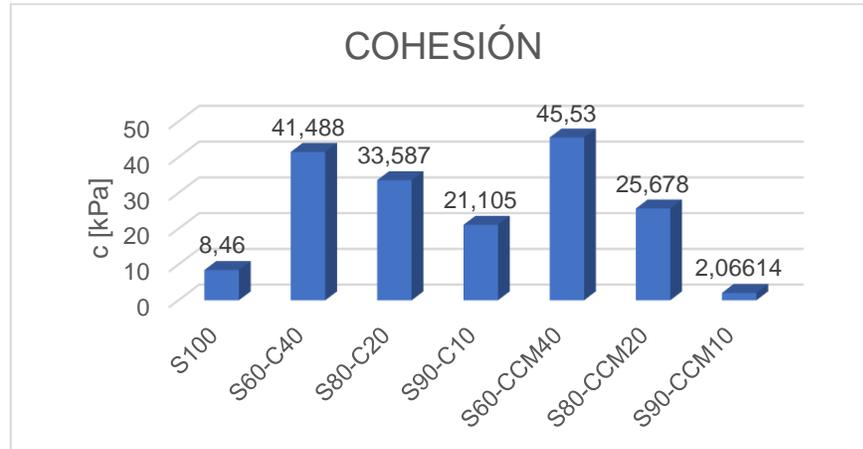
Ilustración 13. Grafica Angulo de Fricción.



Fuente. propia

Las mezclas presentadas obtienen una mayor cohesión debido a que los materiales estabilizantes se caracterizan por tener una particularidad cementante lo que se constata en la ilustración 14 mostrando así que entre mayor material estabilizante se presenta una mayor cohesión entre partículas de las mezclas.

Ilustración 14. Grafica Cohesión.

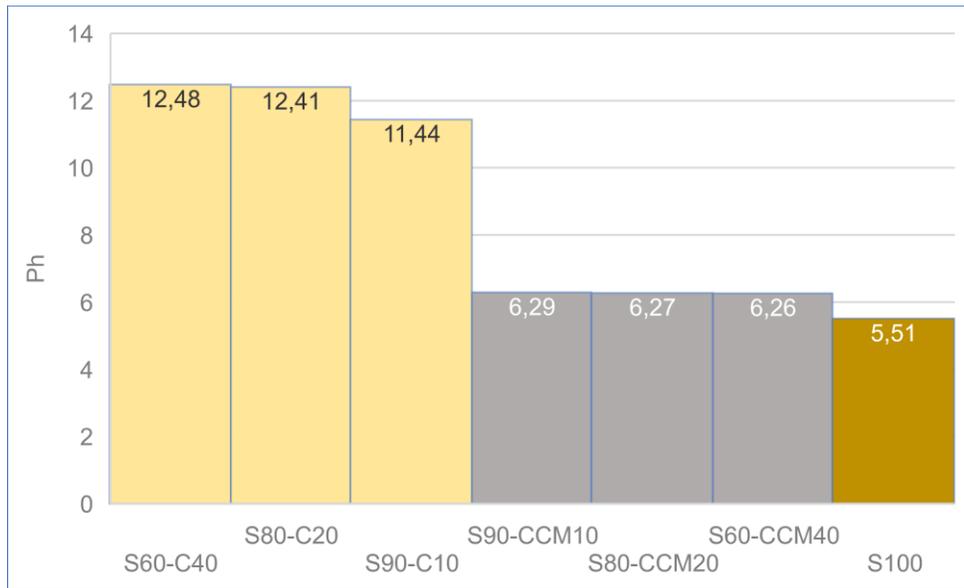


Fuente. propia

#### 8.1.4. Ph.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la variación del Ph obtenido mediante el procedimiento especificado en la norma I.N.V.E - 131, donde cada muestra de suelo fue ensayada por el método A de la misma norma.

Ilustración 15. Grafica Ph Concentraciones.



Fuente. propia

### 8.1.5. Costos.

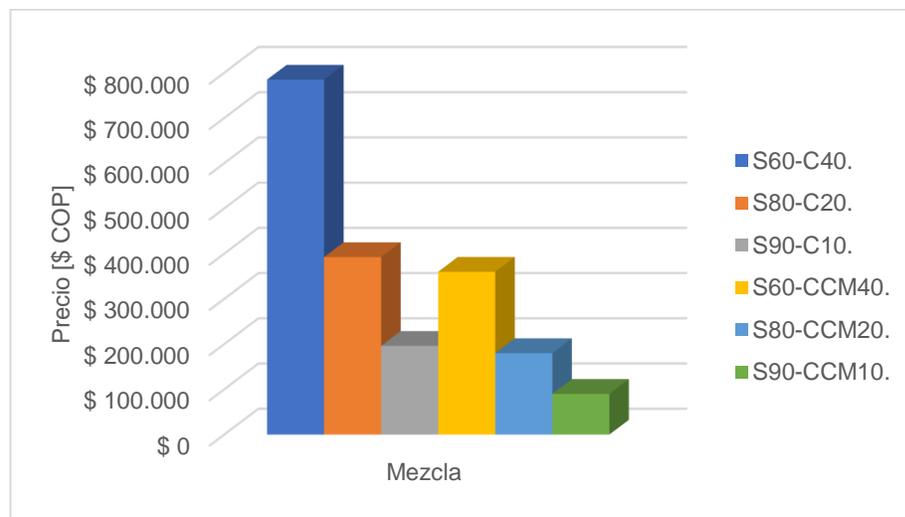
Para el desarrollo ejemplar de los análisis de costos se toma como punto de referencia un metro cubico de material a estabilizar, los precios de los materiales estabilizantes se obtuvieron con base a los costos bases de las empresas de distribución de materiales “Homecenter” y “la leñeria” donde se encuentran los materiales a disposición de esta investigación como lo es la cal y las cenizas volates de carbón mineral.

Los precios a disposición son:

- Material estabilizante bulto cenizas carbón mineral 50 Kg: 25,000.00 COP.
- Material estabilizante bulto CAL Hidratada corona 10 Kg: 10,900.00 COP.

A continuación, se presenta el costo de estabilización según mezcla para 1 m<sup>3</sup>.

Ilustración 16. Grafica Análisis de Costos.



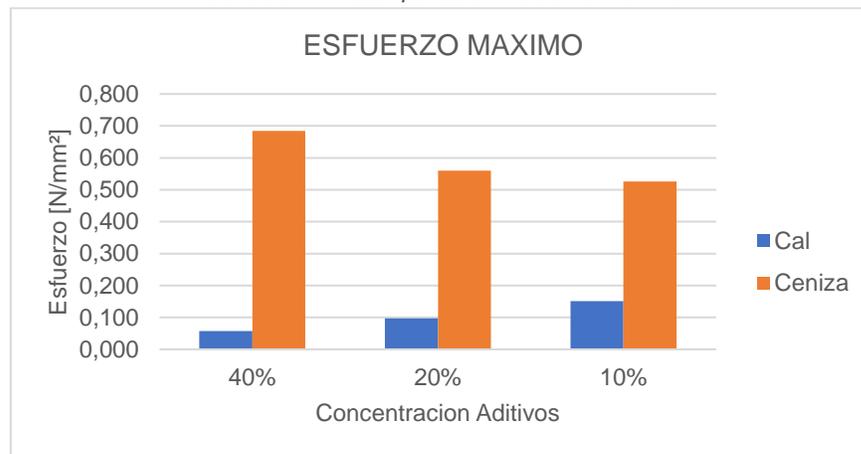
Fuente. propia

## 8.2. Análisis de Resultados.

Como se observó en los resultados dados anteriormente, en el ensayo de Proctor se obtuvo como resultado que la mejor condición del suelo la posee el suelo base, con una densidad óptima mayor que las demás, y una humedad significativamente menor. Se observó que las densidades de las diferentes concentraciones no varían demasiado. En el caso de la humedad, se puede evidenciar la diferencia entre las muestras con cal y las muestras con cenizas, todo esto debido a que las muestras con cenizas requieren entre un 15% y 19% menos agua que las muestras con cal.

Después de haberse completado los ensayos de compresión inconfiada en todas las muestras, se observa que las muestras que tienen cenizas son entre 348% y 1200% más resistentes que las muestras con cal, luego de los resultados obtenidos se observa en los valores picos alcanzados en los ensayos de compresión inconfiada que la cal actúa mejor en bajas concentraciones mientras que las cenizas actúan mejor en altas concentraciones. Obteniendo mejores resultados a las pruebas las muestras con cenizas.

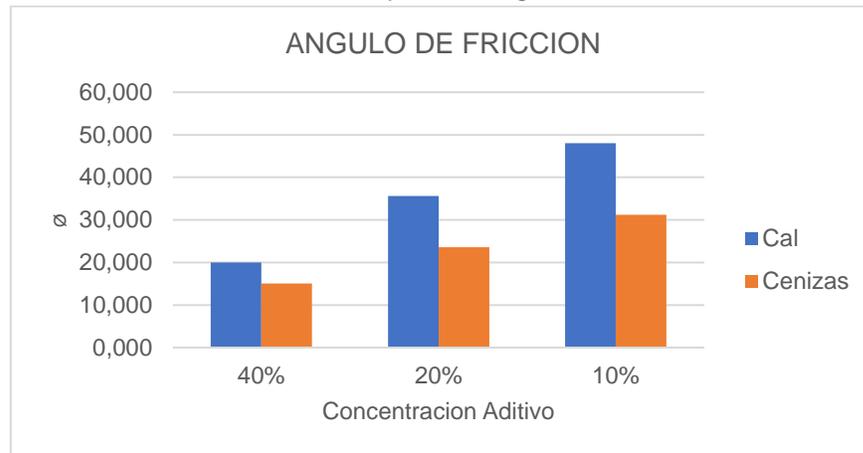
Ilustración 17. Comparación Esfuerzo Máximo.



Fuente. propia

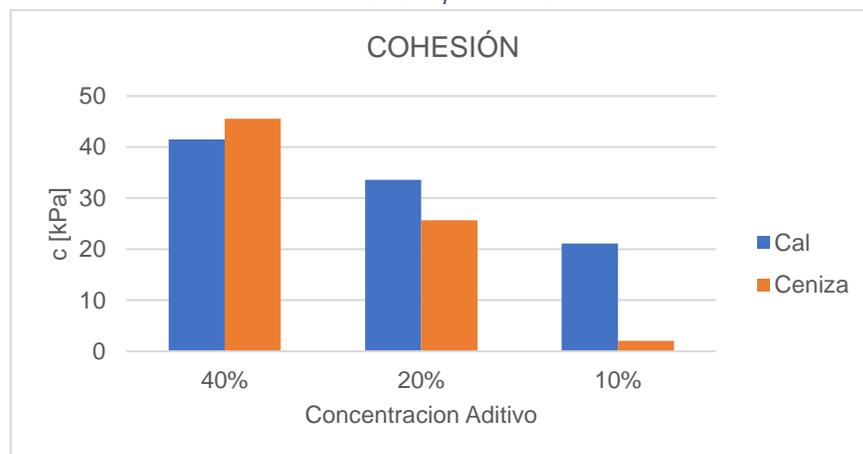
Terminado los ensayos de corte directo, se observó como resultado que los ángulos de fricción, aunque en cantidades diferentes, aumentan a medida que se disminuye la concentración de los agregados y que por el contrario, la cohesión de los suelos disminuye a medida que se disminuye la concentración de los agregados, esto último nos indica que mientras mayor sea la concentración de los aditivos, mayor va a ser su cohesión y por consiguiente, sus partículas internas van a ser más difíciles de separar. Obteniendo mejores resultados a las pruebas las muestras con cenizas.

Ilustración 18. Comparación Ángulos de Fricción.



Fuente. propia

Ilustración 19. Comparación Cohesión.



Fuente. propia

Se puede observar en los resultados de pH de los suelos, que con los dos aditivos y en sus diferentes concentraciones, el pH aumenta con respecto al del suelo base, esto debido a que ambos materiales son alcalinos. Este aumento se puede evidenciar más claramente en el caso de la cal, ya que su pH se duplica con respecto al del suelo base, lo que lo convierte en un suelo alcalino.

Según el análisis de costos, se observa que, debido al alto costo de la cal y a que su comportamiento físico en altas concentraciones no es óptimo, no es viable realizar el mejoramiento de suelo con este material, a menos que se haga con bajas concentraciones, esto debido a que, con bajas concentraciones, la cal sí ofrece una mejoría significativa del suelo tratado. Por el contrario, las cenizas al ser un residuo, se pueden obtener de manera más económica, lo que es un elemento a favor, ya

que, para realizar un buen mejoramiento de suelos con estas se requieren de concentraciones altas.

## **9. Conclusiones.**

Con base a la evidencia obtenida en las pruebas realizadas para estabilizar un suelo con aditivos alternativos, las propiedades físicas y mecánicas obtuvieron resultados diferenciados entre cada una de las concentraciones con los diferentes aditivos. Esto permitió clasificar el comportamiento de cada mezcla de una manera más óptima para así poder determinar cuál es la que mejor comportamiento tenía.

De acuerdo a los datos, en el caso de la cal, la mejor mezcla para realizar la estabilización del suelo es S90-C10, ya que es la que mayor esfuerzo máximo soporta, y es la que mejor relación calidad – precio tiene. Para el caso de las cenizas la mejor mezcla para realizar la estabilización del suelo es S60-CCM40, debido a que esta mezcla fue la que obtuvo los mejores resultados en cada una de las pruebas realizadas y mejoro significativamente el suelo base, además tenía una excelente relación calidad - precio.

Si se trata de los ensayos de compresión inconfiada y de corte directo, en el caso de la adición de cal, la mejor mezcla es S80-C20, debido a que esta mezcla dio en ambas pruebas resultados aceptables. Por el contrario, cuando el aditivo es la ceniza, la mejor mezcla es S60-CCM40, ya que en ambas pruebas su comportamiento dio mejor que el del suelo base y el de las otras mezclas.

Como se puede observar en el análisis de costos, la estabilización por medio de la cal es extremadamente costosa, problema que no ocurre cuando el aditivo es la ceniza, por lo que se recomienda realizar las estabilizaciones del suelo con la ceniza, ya que tiene un bajo costo y mejora el suelo de manera significativa.

## 10. Bibliografía.

- ULLOA LÓPEZ, Horacio. Estabilización de suelos cohesivos por medio de Cal en las Vías de la comunidad de San Isidro del Pegón, municipio Potosí-Rivas. Diss. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, 2015.
- BERRY, Peter L., and David Reid. Mecánica de suelos. McGraw-Hill, 1993.
- DAS, Braja M., and Sergio R. Cervantes González. Fundamentos de ingeniería geotécnica. Thomson Learning, 2001.
- CABO LAGUNA, María. "Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción." (2011).
- INGEOMINAS, IC. "El carbón colombiano, recursos, reservas y calidad." (2004).
- LÓPEZ-LARA, Teresa, et al. "Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas." Revista Iberoamericana de Polímeros 11.3 (2010): 159-168.
- CORRO, Santiago, and Guillermo Prado. Diseño estructural de carreteras con pavimento flexible. UNAM, Instituto de Ingeniería, 1974.
- SIECA, MC. "Manual Centroamericano para el Diseño de Pavimentos." Guatemala: Secretaría de Integración Económica (2002).
- RIVAS ORTIZ, Bayardo Geovanny, and Kevin Uriel Mercado Espinoza. Propuesta de diseño de estructura de pavimento flexible del tramo comprendido del Km 2.3 al Km 2.8 de la carretera Panamericana Sur, aplicando el método de la AASHTO 93. Diss. Universidad Centroamericana, 2015.
- VILLALAZ, Carlos Crespo. Mecánica de suelos y cimentaciones. Editorial Limusa, 2004.
- BADILLO, Eulalio Juárez. Mecánica de suelos. Vol. 2. Editorial Limusa, 2001.
- GARCIA, José. Los estudios sobre la erosión del suelo. Bogotá: José Arnáez., 2013.

- REGINATTO, A. R., and J. C. Ferrero. "Collapse potential of soils and soil-water chemistry." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. Vol. 12. No. 4. Elsevier Science, 1975.
- ZUR, Abraham, and Gdalyah Wiseman. "A study of collapse phenomena of an undisturbed loess: Conference. Session four. 5F, 11R. PROC. EIGHTH INT. CONF. ON SOIL MECH. FOUND. ENGG. MOSCOW, V2. 2, 1973, P265–269." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Vol. 12. No. 4. Pergamon, 1975.
- URIEL, S., and A. Serrano. "Propiedades geotécnicas de dos suelos volcánicos colapsables de baja densidad en la cimentación de dos presas en las Islas Canarias (España)." *Boletín de información laboratorio del transporte y mecánica del suelo* 105 (1974): 21-28.
- PÉREZ COLLANTES, Rocío del Carmen. "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos." (2012).
- ACOSTA, H. A., T. B. Edil, and C. H. Benson. "Soil stabilization and drying using fly ash." *Geo Engineering Rep* 3 (2003).
- Cokca, Erdal. "Use of class c fly ashes for the stabilization of an expansive soil." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127.7 (2001): 568-573.
- INVIAS, IN. "Normas de Ensayo de materiales para carreteras." INV E (2013).
- UGAZ PALOMINO, Roxana María. "Estabilización de suelos y su aplicación en el mejoramiento de subrasante." (2006).

## 11. Anexos.

### 11.1. Fotografías Ensayos de Laboratorio.

Ilustración 20. Muestra Compresión Inconfinada.



Ilustración 21. Máquina Compresión Inconfinada.



Ilustración 22. Anillo de Consolidación.



Ilustración 23. Consolidometro.



Ilustración 24. Consolidación Muestras.



Ilustración 25. Máquina Corte Directo.



*Ilustración 26. Muestra Corte Directo.*



*Ilustración 27. Tamizado de Cenizas.*



*Ilustración 28. Granulometría Cenizas.*



*Ilustración 29. Preparación Moldes.*



Ilustración 30. Preparación Muestras.



Ilustración 31. Preparación de las Mezclas.



Ilustración 32. Medición Ph de las Mezclas.



Ilustración 33. Preparación Proctor.



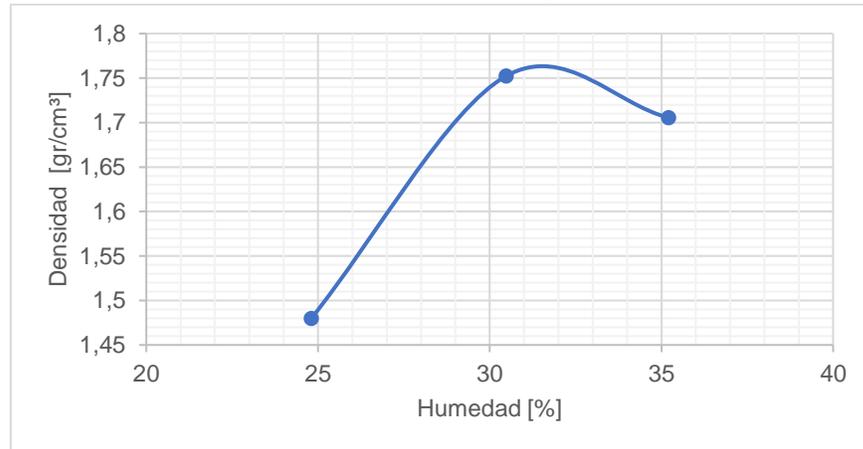
Ilustración 34. Proctor.



## 11.1. Resultados Ensayos De Laboratorio Humedad Optima

### 11.1.1. Mezcla 1. S60-C40.

Ilustración 35. Grafica Humedad Optima S60-C40.

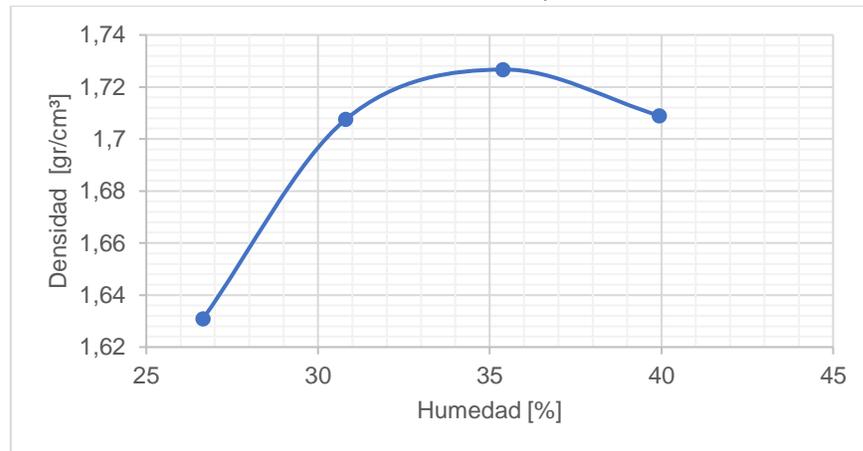


Humedad Optima = 32%

Densidad Máxima = 1,76 gr/cm³

### 11.1.2. Mezcla 2. S80-C20.

Ilustración 36. Grafica Humedad Optima S80-C20.

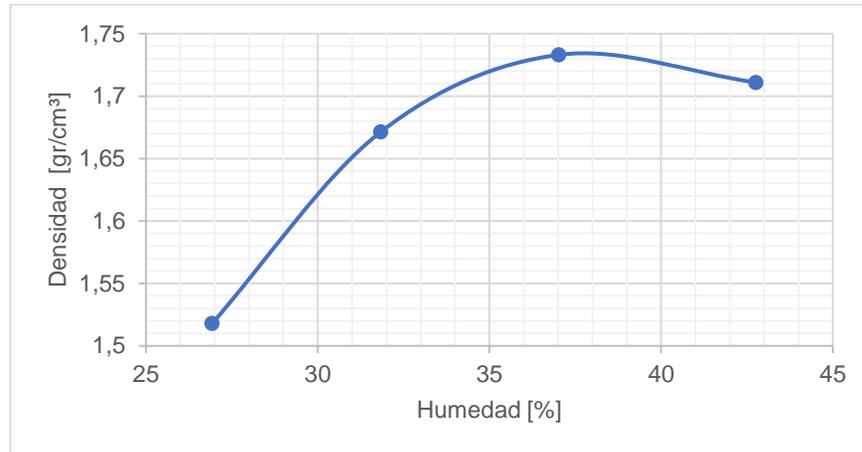


Humedad Optima = 35%

Densidad Máxima = 1,73 gr/cm³

### 11.1.3. Mezcla 3. S90-C10.

Ilustración 37. Grafica Humedad Optima S90-C10.

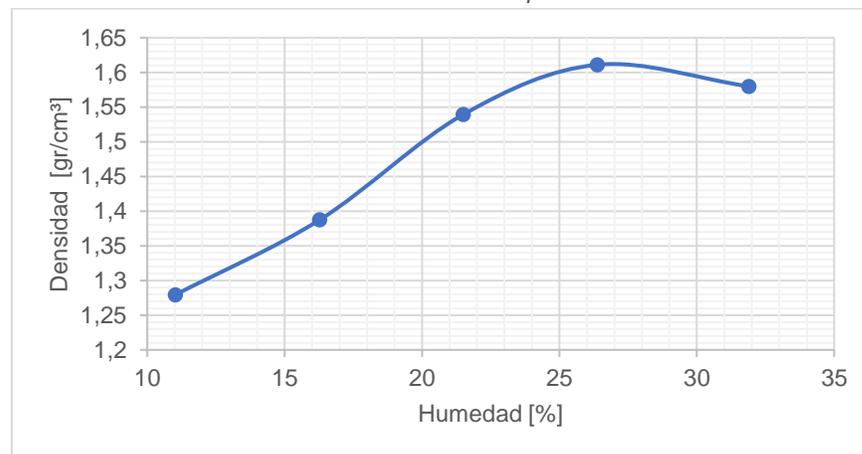


Humedad Optima = 37%

Densidad Máxima = 1,745 gr/cm<sup>3</sup>

### 11.1.4. Mezcla 4. S60-CCM40.

Ilustración 38. Grafica Humedad Optima S60-CCM40.

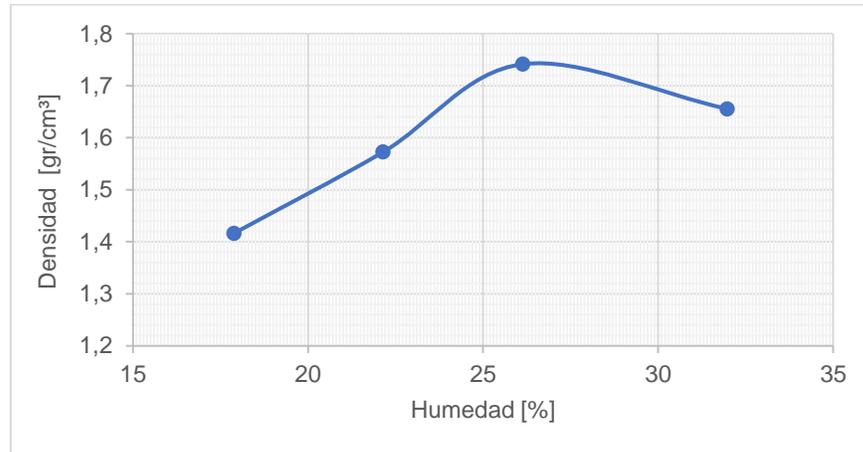


Humedad Optima = 26%

Densidad Máxima = 1,61 gr/cm<sup>3</sup>

### 11.1.5. Mezcla 5. S80-CCM20.

Ilustración 39. Grafica Humedad Optima S80-CCM20.

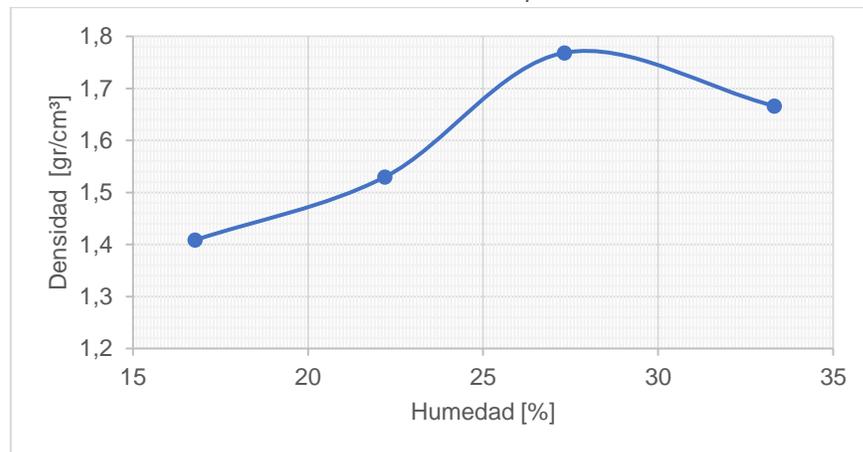


Humedad Optima = 27%

Densidad Máxima = 1,74 gr/cm<sup>3</sup>

### 11.1.6. Mezcla 6. S90-CCM10.

Ilustración 40. Grafica Humedad Optima S90-CCM10.



Humedad Optima = 28%

Densidad Máxima = 1,78 gr/cm<sup>3</sup>

## 11.2. Resultados De Laboratorio Compresión Inconfinada.

### 11.2.1. Mezcla 1. S60-C40.

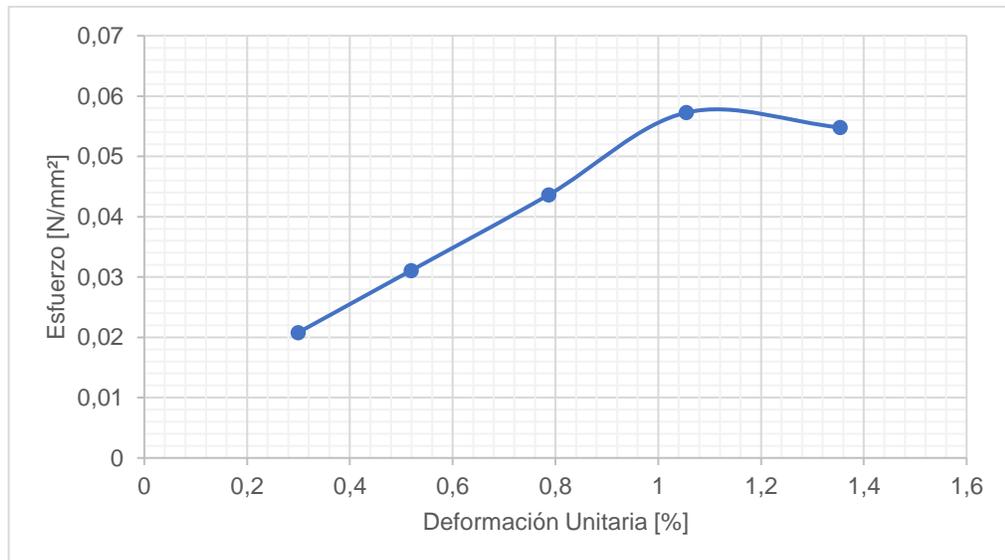
Tabla 8. Dimensiones Cilindro Compresión Inconfinada S60-C40.

Diámetro [mm]	Altura [mm]	Peso [gr]	Área [mm <sup>2</sup> ]	Volumen [mm <sup>3</sup> ]
33,16666667	63,53333333	65,81	863,9597964	54890,24573

Tabla 9. Resumen Laboratorio Compresión Inconfinada S60-C40.

Tiempo (s)	Deformación (mm)	Carga (N)	Deformación Unitaria ( $\epsilon_1$ ) [%]	Área Corregida [mm <sup>2</sup> ]	Esfuerzo [N/mm <sup>2</sup> ]
10	0,19	18	0,299055614	866,5512666	0,020771997
20	0,33	27	0,519412382	868,4707409	0,03108913
30	0,5	38	0,786988458	870,8129941	0,043637383
40	0,67	50	1,054564533	873,1679155	0,057262755
50	0,86	48	1,353620147	875,8150047	0,054806095

Ilustración 41. Grafica Deformación vs. Esfuerzo S60-C40.



### 11.2.2. Mezcla 2. S80-C20.

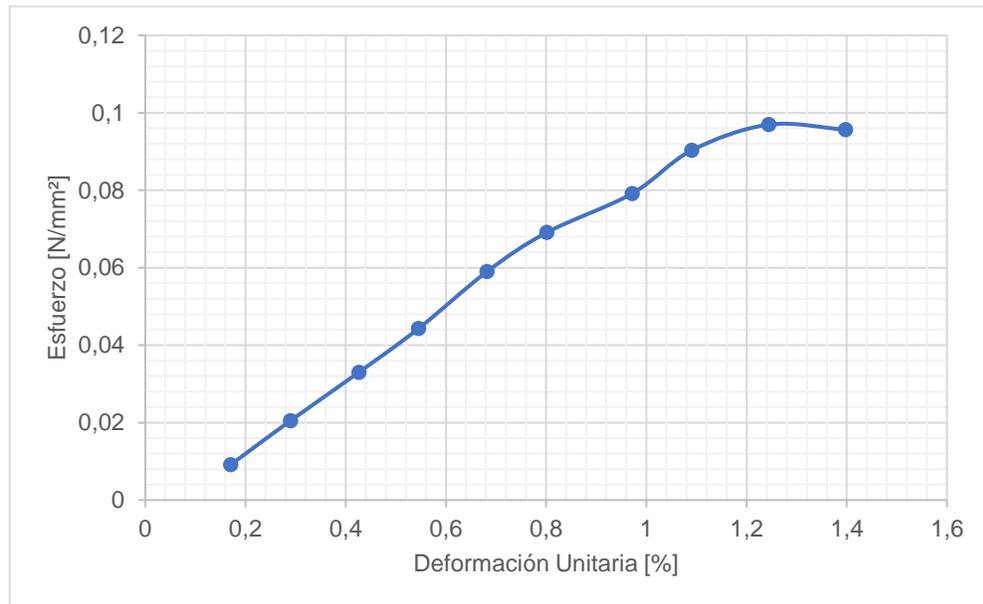
Tabla 10. Dimensiones Cilindro Compresión Inconfinada S80-C20.

Diámetro [mm]	Altura [mm]	Peso [gr]	Área [mm <sup>2</sup> ]	Volumen [mm <sup>3</sup> ]
33,4	58,68666667	65,35	876,1587752	51418,83798

Tabla 11. Resumen Laboratorio Compresión Inconfinada S80-C20.

Tiempo (s)	Deformación (mm)	Carga (N)	Deformación Unitaria ( $\epsilon_1$ ) [%]	Área Corregida [mm <sup>2</sup> ]	Esfuerzo [N/mm <sup>2</sup> ]
10	0,1	8	0,170396456	877,6542669	0,009115207
20	0,17	18	0,289673975	878,7041524	0,02048471
30	0,25	29	0,425991139	879,9071014	0,032958025
40	0,32	39	0,545268658	880,9623869	0,044269767
50	0,4	52	0,681585823	882,1715313	0,058945452
60	0,47	61	0,800863342	883,2322585	0,069064506
70	0,57	70	0,971259798	884,7520158	0,079118215
80	0,64	80	1,090537317	885,8189615	0,090311907
90	0,73	86	1,243894127	887,1945359	0,096934772
100	0,82	85	1,397250937	888,5743891	0,095658845

Ilustración 42. Grafica Deformación vs. Esfuerzo S80-C20.



### 11.2.3. Mezcla 3. S90-C10.

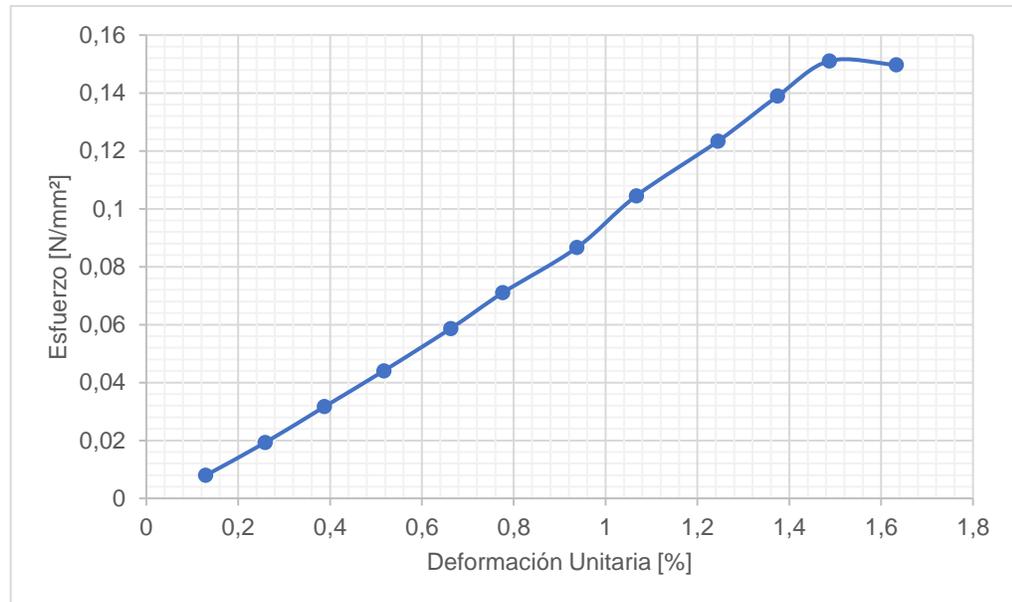
Tabla 12. Dimensiones Cilindro Compresión Inconfinada S90-C10.

Diámetro [mm]	Altura [mm]	Peso [gr]	Área [mm <sup>2</sup> ]	Volumen [mm <sup>3</sup> ]
33,48	61,84666667	71,3	880,3609695	54447,39143

Tabla 13. Resumen Laboratorio Compresión Inconfinada S90-C10.

Tiempo (s)	Deformación (mm)	Carga (N)	Deformación Unitaria ( $\epsilon_1$ ) [%]	Área Corregida [mm <sup>2</sup> ]	Esfuerzo [N/mm <sup>2</sup> ]
10	0,08	7	0,129352161	881,5012104	0,007940999
20	0,16	17	0,258704323	882,6444087	0,019260304
30	0,24	28	0,388056484	883,7905761	0,031681714
40	0,32	39	0,517408645	884,9397241	0,044070798
50	0,41	52	0,662929826	886,2360929	0,05867511
60	0,48	63	0,776112968	887,2470086	0,071006157
70	0,58	77	0,937803169	888,6951811	0,086643882
80	0,66	93	1,06715533	889,8571273	0,104511159
90	0,77	110	1,245014552	891,4597734	0,123393117
100	0,85	124	1,374366713	892,6289649	0,138915501
110	0,92	135	1,487549854	893,6545261	0,151065088
120	1,01	134	1,633071036	894,9765727	0,14972459

Ilustración 43. Grafica Deformación vs. Esfuerzo S90-C10.



#### 11.2.4. Mezcla 4. S60-CCM40.

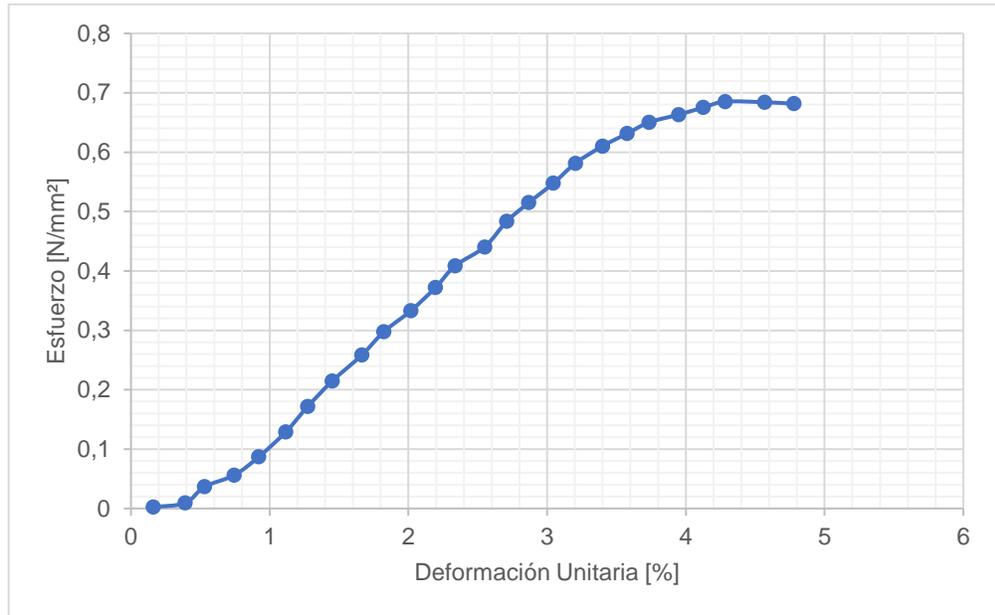
Tabla 14. Dimensiones Cilindro Compresión Inconfinada S60-CCM40.

Diámetro [mm]	Altura [mm]	Peso [gr]	Área [mm <sup>2</sup> ]	Volumen [mm <sup>3</sup> ]
33,23666667	56,49333333	73,52	867,6105103	49014,20976

Tabla 15. Resumen Laboratorio Compresión Inconfinada S60-CCM40.

Tiempo (s)	Deformación (mm)	Carga (N)	Deformación Unitaria ( $\epsilon_1$ ) [%]	Área Corregida [mm <sup>2</sup> ]	Esfuerzo [N/mm <sup>2</sup> ]
10	0,09	2	0,159310833	868,9949133	0,002301509
20	0,22	8	0,389426481	871,0024244	0,009184819
30	0,3	32	0,53103611	872,2424326	0,036687048
40	0,42	49	0,743450555	874,1090791	0,056057077
50	0,52	76	0,920462591	875,6707318	0,086790613
60	0,63	113	1,115175832	877,3950073	0,128790339
70	0,72	151	1,274486665	878,8108372	0,171823097
80	0,82	189	1,451498702	880,3893503	0,214677745
90	0,94	228	1,663913146	882,2910673	0,258418121
100	1,03	263	1,823223979	883,7227555	0,297604648
110	1,14	295	2,01793722	885,478919	0,333153047
120	1,24	330	2,194949257	887,081499	0,372006406
130	1,32	363	2,336558886	888,3677458	0,408614565
140	1,44	392	2,54897333	890,304125	0,440298982
150	1,53	431	2,708284163	891,7619582	0,483312835
160	1,62	460	2,867594996	893,2245735	0,514988071
170	1,72	490	3,044607033	894,8553389	0,547574539
180	1,81	521	3,203917866	896,3281273	0,581260349
190	1,92	548	3,398631107	898,1347989	0,610153399
200	2,02	568	3,575643144	899,7835594	0,631262923
210	2,11	586	3,734953977	901,2726281	0,65019172
220	2,23	599	3,947368421	903,2657367	0,663149255
230	2,33	611	4,124380458	904,9334069	0,675187804
240	2,42	621	4,283691291	906,4395838	0,68509806
250	2,58	622	4,56691055	909,1296481	0,684170845
260	2,7	621	4,779324994	911,1576979	0,681550517

Ilustración 44. Grafica Deformación vs. Esfuerzo S60-CCM40.



### 11.2.5. Mezcla 5. S80-CCM20.

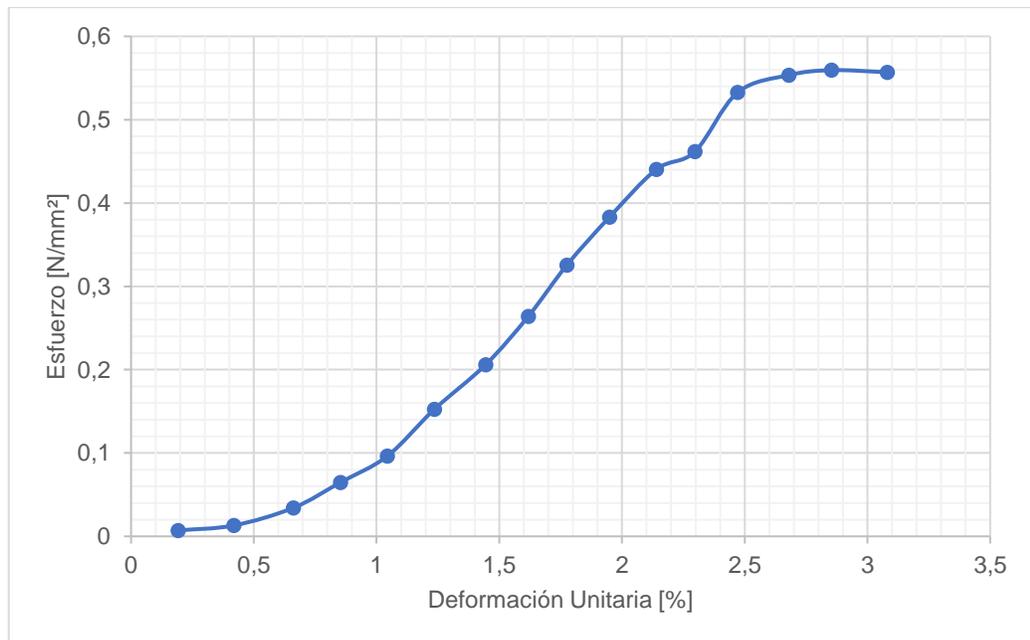
Tabla 16. Dimensiones Cilindro Compresión Inconfinada S80-CCM20.

Diámetro [mm]	Altura [mm]	Peso [gr]	Área [mm <sup>2</sup> ]	Volumen [mm <sup>3</sup> ]
32,74666667	57,46666667	73,51	842,2171478	48399,41209

Tabla 17. Resumen Laboratorio Compresión Inconfinada S80-CCM20.

Tiempo (s)	Deformación (mm)	Carga (N)	Deformación Unitaria ( $\epsilon_1$ ) [%]	Área Corregida [mm <sup>2</sup> ]	Esfuerzo [N/mm <sup>2</sup> ]
10	0,11	6	0,191415313	843,8323721	0,007110417
20	0,24	11	0,417633411	845,7492793	0,013006219
30	0,38	29	0,6612529	847,8234046	0,034205236
40	0,49	55	0,852668213	849,4602251	0,064746999
50	0,6	82	1,044083527	851,1033779	0,096345523
60	0,71	130	1,23549884	852,7528999	0,152447444
70	0,83	176	1,444315545	854,5596861	0,205954017
80	0,93	226	1,618329466	856,0712002	0,263996733
90	1,02	279	1,774941995	857,4361419	0,325388663
100	1,12	329	1,948955916	858,9578577	0,383022283
110	1,23	379	2,14037123	860,6379958	0,440370983
120	1,32	398	2,296983759	862,0175509	0,461707537
130	1,42	460	2,47099768	863,5555863	0,532681402
140	1,54	479	2,679814385	865,4084889	0,553495842
150	1,64	485	2,853828306	866,9586594	0,559426905
160	1,77	484	3,080046404	868,9822028	0,556973432

Ilustración 45. Grafica Deformación vs. Esfuerzo S80-CCM20.



### 11.2.6. Mezcla 6. S90-CCM10.

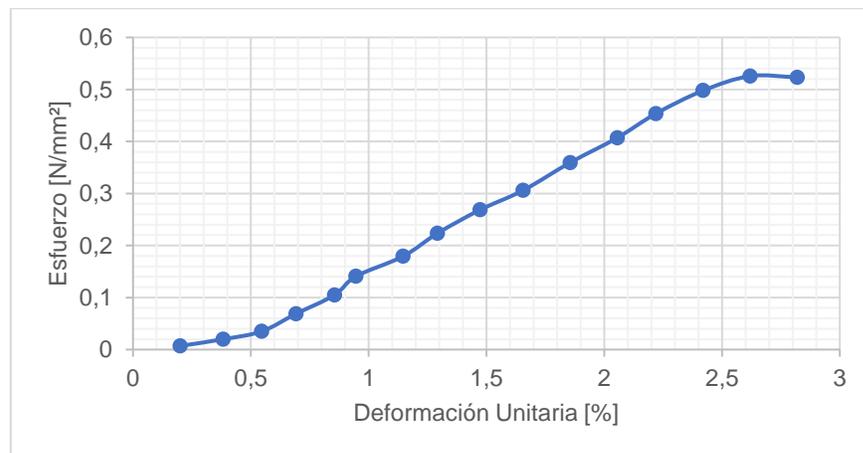
Tabla 18. Dimensiones Cilindro Compresión Inconfinada S90-CCM10.

Diámetro [mm]	Altura [mm]	Peso [gr]	Área [mm <sup>2</sup> ]	Volumen [mm <sup>3</sup> ]
33,08333333	54,96666667	74,66	859,623744	47250,65179

Tabla 19. Resumen Laboratorio Compresión Inconfinada S90-CCM10.

Tiempo (s)	Deformación (mm)	Carga (N)	Deformación Unitaria ( $\epsilon_1$ ) [%]	Área Corregida [mm <sup>2</sup> ]	Esfuerzo [N/mm <sup>2</sup> ]
10	0,11	6	0,200121286	859,6409472	0,006979658
20	0,21	17	0,382049727	859,6565871	0,019775338
30	0,3	30	0,545785324	859,6706636	0,034897085
40	0,38	59	0,691328078	859,6831763	0,068629934
50	0,47	90	0,855063675	859,6972536	0,104688016
60	0,52	121	0,946027896	859,7050745	0,140745941
70	0,63	154	1,146149181	859,722281	0,179127613
80	0,71	192	1,291691935	859,7347952	0,223324682
90	0,81	231	1,473620376	859,7504386	0,26868262
100	0,91	263	1,655548817	859,7660825	0,305897157
110	1,02	309	1,855670103	859,7832914	0,359392888
120	1,13	350	2,055791389	859,800501	0,407071175
130	1,22	390	2,219526986	859,8145822	0,453586166
140	1,33	428	2,419648272	859,831793	0,497771778
150	1,44	452	2,619769557	859,8490046	0,525673691
160	1,55	450	2,819890843	859,8662169	0,523337225

Ilustración 46. Grafica Deformación vs. Esfuerzo S90-CCM10.



### 11.3. Resultados De Laboratorio Corte Directo.

#### 11.3.1. Mezcla 1. S60-C40.

Ilustración 47. Envoltente Corte Directo S60-C40.

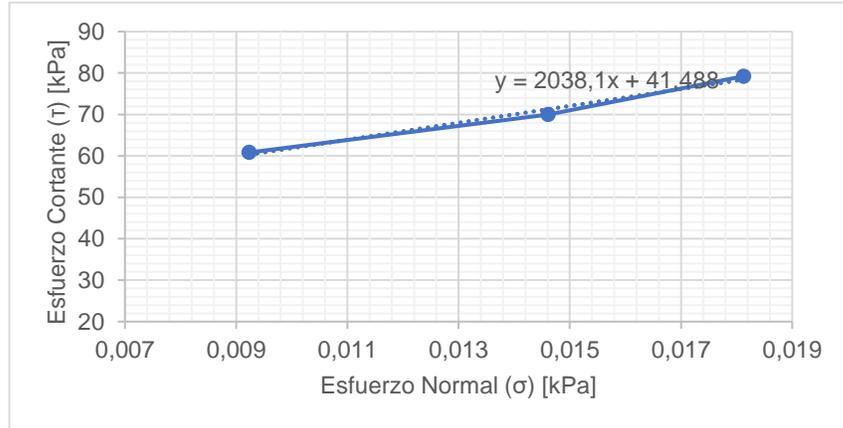


Tabla 20. Resultados Corte Directo S60-C40.

RESULTADOS	
Pendiente	2069,074963
Angulo de Fricción (φ)	20,0
Cohesión (c) [kPa]	41,5

#### 11.3.2. Mezcla 2. S80-C20.

Ilustración 48. Envoltente Corte Directo S80-C20.

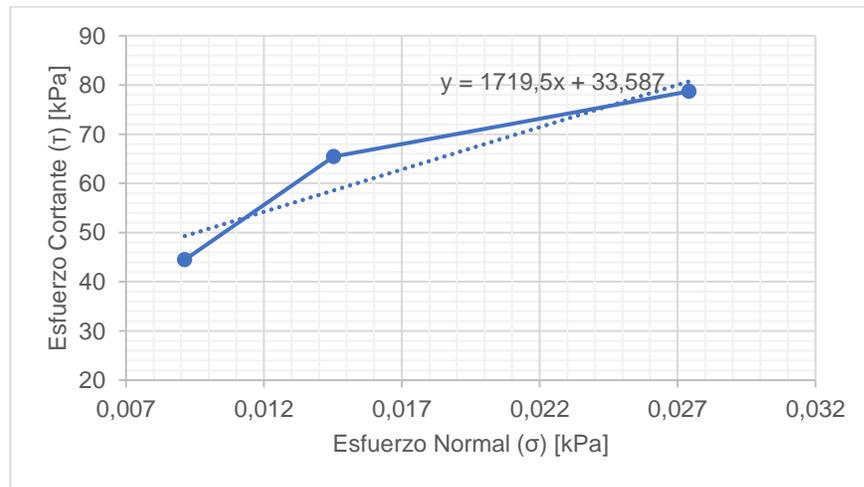


Tabla 21. Resultados Corte Directo S80-C20.

RESULTADOS	
Pendiente	1031,45733
Angulo de Fricción ( $\phi$ )	35,6
Cohesión (c) [kPa]	33,6

### 11.3.3. Mezcla 3. S90-C10.

Ilustración 49. Envolvente Corte Directo S90-C10.

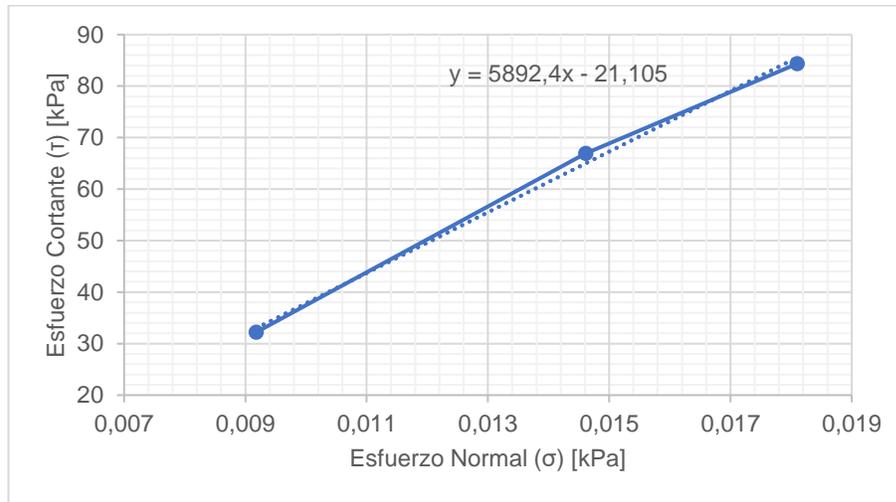


Tabla 22. Resultados Corte Directo S90-C10.

RESULTADOS	
Pendiente	5844,235178
Angulo de Fricción ( $\phi$ )	48,1
Cohesión (c) [kPa]	21,1

### 11.3.4. Mezcla 4. S60-CCM40.

Ilustración 50. Envolvente Corte Directo S60-CCM40.

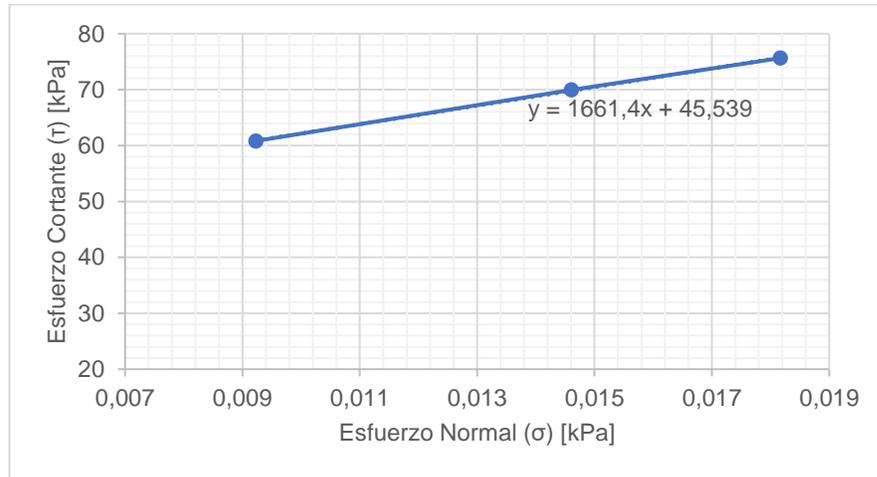


Tabla 23. Resultados Corte Directo S60-CCM40.

RESULTADOS	
<b>Pendiente</b>	1697,773617
<b>Angulo de Fricción (φ)</b>	15,1
<b>Cohesión (c) [kPa]</b>	45,5

### 11.3.5. Mezcla 5. S80-CCM20.

Ilustración 51. Envolvente Corte Directo S80-CCM20.

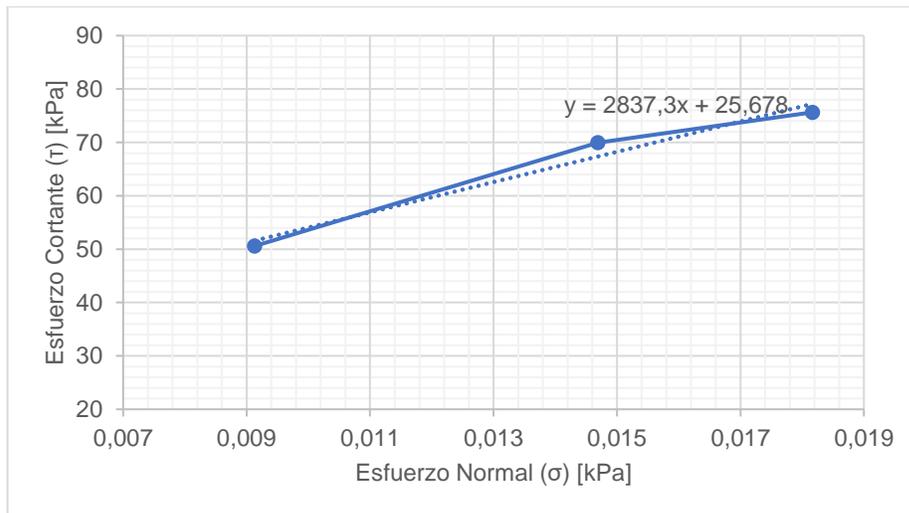


Tabla 24. Resultados Corte Directo S80-CCM20.

RESULTADOS	
Pendiente	2771,351951
Angulo de Fricción ( $\phi$ )	23,6
Cohesión (c) [kPa]	25,7

### 11.3.6. Mezcla 6. S90-CCM10.

Ilustración 52. Envolvente Corte Directo S90-CCM10.

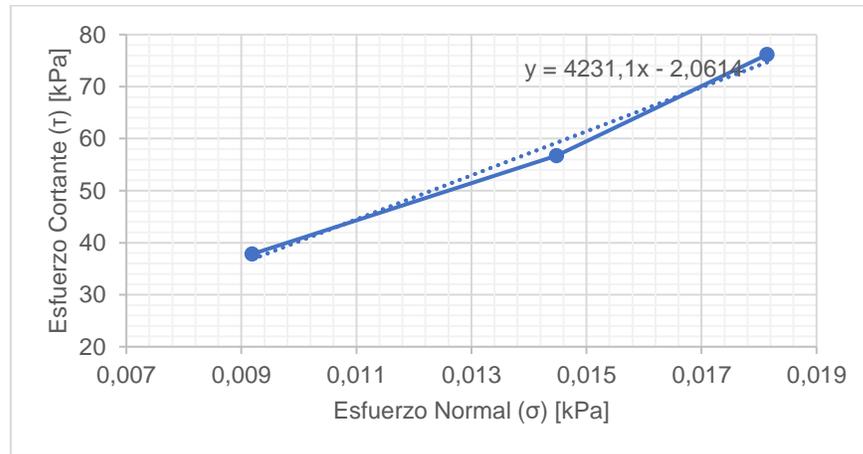


Tabla 25. Resultados Corte Directo S90-CCM10.

RESULTADOS	
Pendiente	3574,060809
Angulo de Fricción ( $\phi$ )	31,2
Cohesión (c) [kPa]	2,1